

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Darko Rašić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Zdravko Schauperl , dipl. ing.

Student:

Darko Rašić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Darko Rašić

Zahvala

Iskreno zahvaljujem svom mentoru prof.dr.sc. Zdravku Schauperlu na povjerenju i potpori tijekom izrade ovog rada.

Također se zahvaljujem Laboratoriju za metalografiju za pruženu pomoć pri izvođenju eksperimentalnog dijela rada.

Od srca se zahvaljujem mami, tati i bratu koji su mi uvijek bili najveća podrška, koji su imali ogromno razumijevanje i strpljenje, koji su mi najviše pomogli da sve uravnotežim i bez kojih ovo sve ne bi bilo moguće. Njima ujedno i posvećujem ovaj rad

Darko Rašić

OVDJE IDE TEKST ZADATKA

SADRŽAJ

SADRŽAJ	1
POPIS SLIKA	3
POPIS TABLICA.....	5
POPIS OZNAKA	6
SAŽETAK.....	8
1. UVOD.....	9
2. ČELICI ZA IZGRADNJU CJEVOVODA.....	10
2.1. Općenito o čelicima visoke čvrstoće.....	11
2.2. Klasifikacija čelika za cjevovode prema normama.....	12
2.2.1. Američka norma API 5L.....	13
2.2.2. Europska norma EN 10208 - 2:2009	13
2.2.3. Razlike između norme EN 10208 - 2:2009 i API 5L.....	14
2.3. Mehanizmi očvršnuća	16
2.3.1. Očvršnuće kristalima mješancima (očvršnuće legiranjem)	17
2.3.2. Očvršnuće martenzitnom transformacijom	18
2.3.3. Očvršnuće hladnom deformacijom	18
2.3.4. Očvršnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna).....	18
2.3.5. Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom)	19
2.3.6. Očvršnuće disperzijom faza	19
2.4. Razvoj čelika za cjevovode.....	20
3. UTJECAJ METALURŠKIH TRANSFORMACIJA NA SVOJSTVA ČELIKA.....	25
3.1. Mikrostrukturne faze čelika	25
3.1.1. Prikaz mikrostrukturnih pretvorbi pomoću TTT dijagrama	28
3.1.2. Metalurške transformacije čelika visoke čvrstoće	30
3.2. Mikrostrukturne faze čelika za cjevovode	36
3.3. Utjecaj legiranih elemenata na svojstva čelika	37
3.3.1. Legiranje ugljikom (C)	37
3.3.2. Legiranje silicijem (Si)	38
3.3.3. Legiranje manganom (Mn)	39
3.3.4. Legiranje dušikom (N).....	39
3.3.5. Legiranje molibdenom (Mo).....	39
3.3.6. Legiranje vanadijem (V)	39
3.3.7. Legiranje niobijem (Nb)	40
3.3.8. Legiranje titanom (Ti).....	40
3.3.9. Legiranje ostalim legirajućim elementima.....	40
3.3.10. Mikrolegiranje čelika visoke čvrstoće	42
3.4. Utjecaj mikrostrukture na mehanička svojstva čelika.....	44
3.5. Način proizvodnje čelika povišene čvrstoće	46
3.5.1. Proces kontroliranog termomehaničkog valjanja čelika u obliku trake.....	46
3.5.2. Predgrijavanje	46
3.5.3. Grubo termomehaničko valjanje.....	46
3.5.4. Završno termomehaničko valjanje	47

3.5.5.	Snažna redukcija debljine lima	47
3.5.6.	Režim hlađenja.....	47
3.5.7.	Temperatura namatanja.....	47
3.5.8.	Oblikovanje cijevi i postupak zavarivanja	48
4.	ZAVARIVANJE I ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE	50
4.1.	Ekvivalent ugljika	51
4.2.	Greške u zavarenim spojevima	52
4.3.	Metalurgija zavarivanja.....	53
4.3.1.	Metalurgija zone taljenja (ZT)	54
4.3.2.	Metalurgija zone utjecaja topline (ZUT)	56
4.3.3.	Mikrofaze zavarenog spoja	58
4.4.	Zavarljivost čelika visoke čvrstoće	60
5.	MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA	61
5.1.	Osnove MAG postupka.....	63
5.2.	Metode prijenosa metala	65
5.2.1.	Prijenos metala kratkim spojevima	65
5.2.2.	Prijenos metala mješovitim lukom.....	66
5.3.	Modificirani MAG postupci zavarivanja: STT Postupak zavarivanja.....	68
5.3.1.	Karakteristike STT postupka zavarivanja	69
5.3.2.	Parametri zavarivanja kod STT postupka	70
5.3.3.	Opis rada STT postupka zavarivanja	72
5.4.	Modificirani MAG postupak zavarivanja: FastRoot postupak zavarivanja.....	75
5.4.1.	Karakteristike FastRoot postupka zavarivanja.....	76
5.4.2.	Opis rada FastRoot postupka zavarivanja	79
6.	EKSPERIMENTALNI RAD.....	81
6.1.	Opis eksperimenta.....	81
6.1.1.	Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm	82
6.1.2.	Izvor struje za MIG/MAG zavarivanje - VPS 4000 digit	84
6.1.3.	Izrada upravljačkog programa na robotskoj jedinici Almego AX V6	85
6.1.4.	Priprema uzoraka za makro i mikroanalizu	87
6.1.5.	Ispitivanje geometrije zavara	89
6.1.6.	Mjerenje tvrdoće po Vickersu.....	90
6.2.	Osnovni materijal.....	91
6.3.	Dodatni materijal.....	92
6.4.	Priprema spoja.....	93
6.5.	Oblikovanje plana pokusa.....	94
7.	REZULTATI MJERENJA, ANALIZA I RASPRAVA	98
7.1.	Analiza makrostrukture.....	98
7.1.1.	Analiza geometrije zavara.....	102
7.1.2.	Analiza mikrostrukture	103
7.2.	Rezultati mjerenja tvrdoće HV10	115
8.	ZAKLJUČAK.....	122
	LITERATURA.....	124

POPIS SLIKA

Slika 1.	Procijenjeni troškovi po metru cjevovoda [2]	11
Slika 2.	Označavanje čelika za cjevovode prema API 5L [2]	13
Slika 3.	Usporedba kemijskog sastava čelika X80 prema normama EN 10208-2 i	15
Slika 4.	Usporedba mehaničkih svojstava čelika X80 prema normama EN 10208-2	15
Slika 5.	Shematski prikaz ovisnosti čvrstoće metala o gustoći dislokacija [2]	17
Slika 6.	Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu rekristalizacije	21
Slika 7.	Mehanizam očvršćivanja za čelike X60, X70 i X80	23
Slika 8.	Kronološki razvoj čelika za cjevovode	24
Slika 9.	Dijagram stanja Fe - C za metastabilnu kristalizaciju [2]	26
Slika 10.	TTT dijagram za podeutektoidni čelik [2]	28
Slika 11.	TTT dijagram za eutektoidni čelik [2]	29
Slika 12.	TTT dijagram za nadeutektoidni čelik [2]	29
Slika 13.	Neprekinuti ili kontinuirani lijev [2]	31
Slika 14.	Uopćeni dijagram postupka NTTMO (RT – rastvorno žarenje; G – gašenje; S - starenje) [2]	32
Slika 15.	Dijagram postupka visokotemperaturne termomehaničke obradbe [2]	33
Slika 16.	Postupci reguliranog valjanja čelika [13]	35
Slika 17.	Tipične mikrostrukture i veličine zrna čelika X60, X70 i X80 [3]	36
Slika 18.	Utjecaj ugljika na udarnu radnju loma u ovisnosti o temperaturi [8]	38
Slika 19.	Utjecaj legirnih elemenata niobija, vanadija i titana na veličinu feritnog	43
Slika 20.	Ovisnost tvrdoće i granice razvlačenja mikrostrukturnih sastojaka	44
Slika 21.	TTT diagram čelika X100	49
Slika 22.	Shematski prikaz zavarenog spoja	53
Slika 23.	Proces kristalizacije – skrućivanje kupke i rast kristala [15]	55
Slika 24.	ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno – perlitnog čelika	56
Slika 25.	Promjena mikrostrukture čelika u ZUT-u u ovisnosti o unesenoj toplini [2]	59
Slika 26.	Presjek pištolja u radu kod MIG/MAG postupka zavarivanja [14]	63
Slika 27.	Shematski prikaz djelovanja sila na kapljicu metala u električnom luku [14]	64
Slika 28.	Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima [14]	65
Slika 29.	Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom [14]	66
Slika 30.	Prijenos metala štrcajućim lukom [14]	67
Slika 31.	Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [12]	70
Slika 32.	Utjecaj pozadinske struje na geometriju zavora [12]	71
Slika 33.	Prikaz dinamičke karakteristike $U, I = f(t)$ [12]	72
Slika 34.	Utjecaj osnovne struje zavarivanja na geometriju zavarenog spoja [14]	77
Slika 35.	Utjecaj F _{Pu} razine na geometriju zavarenog spoja [14]	78
Slika 36.	Prikaz odvajanja kapljice rastaljenog materijala u kupku [14]	80
Slika 37.	Prikaz robota Almaga AX -V6 [2]	82
Slika 38.	Robot OTC Almaga AX-V6 [17]	83
Slika 39.	izvora struje VPS 4000 digit [12]	84
Slika 40.	Upravljački program 111 [17]	85
Slika 41.	Upravljački program 778 [17]	86
Slika 42.	Parametri njihanja programa 111 [17]	86
Slika 43.	Phoenix Alpha Grinder Polisher uređaj sa vodenim hlađenjem [18]	87
Slika 44.	Uređaj za poliranje DAP-V [18]	88

Slika 45.	DP - Lubricant Blue - tekućina za rashlađivanje.....	88
Slika 46.	Mikroskop Olympus GX51 Analy [18].....	89
Slika 47.	Sučelje i alatna traka programa „Image J“	89
Slika 48.	Uređaj za mjerenje tvrdoće po metodi Vickers [17]	90
Slika 49.	Skica pripreme zavarenog spoja.....	93
Slika 50.	Model centralno kompozitnog pokusa sa tri faktora i jednim.....	95
Slika 51.	Model potpunog faktorskog plana pokusa 3k [19].....	95
Slika 52.	Mjerene geometrijske značajke makroizbruska	98
Slika 53.	Geometrija zavora prema stanju pokusa.....	102
Slika 54.	Snimanje uzoraka za mikroanalizu.....	103
Slika 55.	Mikrostruktura osnovnog materijala API 5L X80 – povećanje 200x	104
Slika 56.	Mikrostruktura materijala kod linije staljivanja	105
Slika 57.	Mikrostruktura metala zavora.....	105
Slika 58.	Raspored mjernih mjesta za mjerenje tvrdoće HV10.....	115
Slika 59.	Raspored vrijednosti tvrdoća linija 1.....	117
Slika 60.	Raspored vrijednosti tvrdoća linija 2.....	117
Slika 61.	Dijagram izmjerenih tvrdoća u metalu zavora	118
Slika 62.	Usporedba tvrdoće kod uzoraka 13 i 51	119
Slika 63.	Usporedba tvrdoće kod uzoraka 21 i 41	120
Slika 64.	Usporedba tvrdoća kod uzorka 71 i 81.....	121

POPIS TABLICA

Tablica 1. Formule za izračunavanje ekvivalenta ugljika [2]	51
Tablica 2. Tehničke karakteristike izvora struje VPS 4000 digit [17]	84
Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala X80	91
Tablica 4. Mehanička svojstva čelika gradacije API 5L X80	92
Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala LNM MoNi.....	93
Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala.....	93
Tablica 7. Stanje pokusa.....	97
Tablica 8. Geometrijske značajke zavarenih uzoraka i makroizbrusci	99
Tablica 9. Geometrijske značajke zavarenih uzoraka i makroizbrusci (nastavak 1).....	100
Tablica 10. Geometrijske značajke zavarenih uzoraka i makroizbrusci (nastavak 2).....	101
Tablica 11. Prikaz mikrostrukture u uzorku 13.....	106
Tablica 12. Prikaz mikrostrukture u uzorku 21	107
Tablica 13. Prikaz mikrostrukture u uzorku 33	108
Tablica 14. Prikaz mikrostrukture u uzorku 41	109
Tablica 15. Prikaz mikrostrukture u uzorku 51	110
Tablica 16. Prikaz mikrostrukture u uzorku 61	111
Tablica 17. Prikaz mikrostrukture u uzorku 71	112
Tablica 18. Prikaz mikrostrukture u uzorku 81	113
Tablica 19. Vrijednosti izmjerene tvrdoće HV10	116

POPIS OZNAKA

Oznaka	Opis	Jedinica
F_g	Sila gravitacije	N
F_{em}	Elektromagnetna sila	N
F_{pn}	Sila površinske napetosti	N
F_{pl}	Sila strujanja i pritiska plazme	N
F_e	Sila eksplozije u kapljicama metala	N
F_r	Sila reaktivnog djelovanja	N
R_m	Vlačna čvrstoća	N/mm ²
$R_{p0,2}$	Konvencionalna granica razvlačenja	N/mm ²
R_p	Granica razvlačenja	N/mm ²
KV	Udarna radnja loma	J
v_z	Brzina zavarivanja	cm/min
I	Jakost struje	A
d_z	Promjer žice dodatnog materijala	mm
Q	Protok plina	l/min
l_{skz}	Duljina slobodnog kraja žice	mm
U	Napon	V
$v_{\dot{z}}$	Brzina dobave žice	m/min
a	Širina zavora	mm
b	Nadvišenje zavora	mm
c	Širina zone utjecaja topline	m/min

I_{PC}	Vršna struja	A
I_{BC}	Pozadinska struja	A
P_{cm}	Ekvivalent ugljika	-
HV	Tvrdoća po Vickersu	-
k	Broj faktora	-
n_0	Broj ponavljanja	-

Grčke oznake

Oznaka	Opis	Jedinica
α -Fe	Ferit	-
γ -Fe	Austenit	-
δ -Fe	Delta željezo	-

SAŽETAK

U uvodnom dijelu rada opisani su čelici visoke čvrstoće s posebnim osvrtom na čelike za cjevovode. Opis sadrži pregled primjene, podjele, klasifikacije prema normama čelika visoke čvrstoće. Također dan je općenit pregled mehanizama očvrstnuća čelika kao i način proizvodnje.

U daljnjem teorijskom dijelu rada objašnjene su metalurške transformacije čelika, pojedine mikrostrukturne faze koje se pojavljuju pri zagrijavanju i hlađenju čelika, zatim utjecaj pojedinih legirnih elemenata na svojstva čelika, sa naglaskom na legiranje čelika visoke čvrstoće koji se primjenjuju pri izgradnji cjevovoda. Također, opisani su i utjecaji mikrostrukture na pojedina mehanička svojstva čelika.

U četvrtom poglavlju objašnjeni su ključni pojmovi zavarljivosti čelika, te detaljno opisana metalurgija zavarivanja, određene pojave tijekom i nakon primjene. Teorijski dio ovog rada zaključen je posebnim osvrtom na zavarljivost čelika visoke čvrstoće te problemima, odnosno greškama koje se mogu pojaviti u tijekom provođenja tehnologije zavarivanja.

Nadanje u petom poglavlju dane su osnove MIG/MAG tehnologije zavarivanja kao i specijalni postupci STT i FastRoot.

U eksperimentalnom dijelu rada napravljena su ispitivanja i analize rezultata zavarenih uzoraka, pri čemu se kao osnovni materijal koristio API 5L X80 čelika za cjevovode. Ispitivanja i analize rezultata su se provodila na područjima makrostrukture, odnosno geometrije zavora, analize mikrostrukture zavarenog spoja, te mjerenja tvrdoće HV10.

U posljednjem dijelu rada doneseni su zaključci, na temelju dobivenih rezultata i analiza, o utjecajima parametara zavarivanja na kvalitetu zavarenog spoja u pogledu dobivanja odgovarajuće geometrije zavora, zadovoljavajuće mikrostrukture te prihvatljivih vrijednosti tvrdoća.

1. UVOD

Čelik je danas a bit će i u budućnosti, najvažniji konstrukcijski i alatni materijal u strojarstvu. Njegovo se istaknuto mjesto među ostalim materijalima zasniva na njegovim svojstvima, koja se mogu regulirati u širokom rasponu legiranjem, toplinskom obradbom, oblikovanjem deformiranjem te kombinacijom ovih triju postupaka. Osim toga čelici se razmjerno lako spajaju međusobno, a i s drugim materijalima, zavarivanjem, lemljenjem i lijepljenjem. Razmjerno su lako obradljivi odvajanjem čestica, mogu se relativno učinkovito zaštititi od korozije a i troškovi su njihove primjene još uvijek podnošljivi. Iako čelici nisu u svakom smislu najbolji materijal, oni su tehnički rentabilni, tj. oni zadovoljavaju osnovni zakon inženjerske djelatnosti: "Upravo zadovoljavajuća kvaliteta uz prihvatljive troškove".

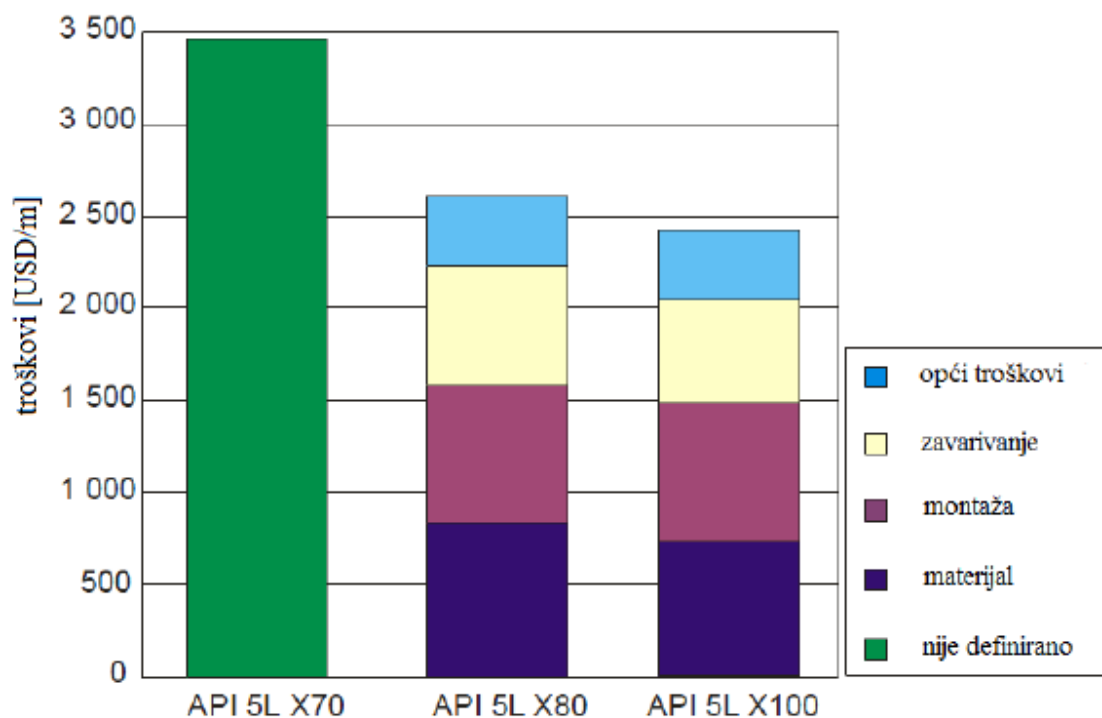
Pojam "čelik" posljednjih se desetljeća uvelike različito definirao. Danas se općenito čelicima smatraju one željezne legure do najviše 2 % ugljika koje se nakon ulijevanja u kalupe (kokile) još i oblikuje deformacijom u toplom stanju npr. valjanjem kovanjem prešanjem [1].

Da bi neki čelik bio uopće primjenjiv u nekim uvjetima eksploatacije, mora zadovoljiti zahtjeve koji su usko vezani uz svojstva materijala, npr. mehanička svojstva, korozijska postojanost itd. U vidu treba imati i činjenicu da će se taj materijal u bilo kojoj fazi izrade konstrukcije dakle prije ili nakon montaže tehnološki obrađivati. U tom smislu materijal treba i nakon tehnološke obrade zadržati približno ista svojstva koja je imao prije te obrade, ako je na temelju tih svojstava bio deklariran kao zadovoljavajući materijal. Zavarivanje, kao jedna od tehnoloških obrada neizostavna u većini procesa, predstavlja veliki izazov očuvanja dovoljno dobrih svojstava materijala. Prilikom zavarivanja određeni parametri samog postupka mogu bitno narušiti svojstva čelika, pogotovo u slučaju kada nisu pomno određeni i prilagođeni materijalu koji se zavaruje. U novije vrijeme razvoj određenih područja ispitivanja i primjena istih omogućila je istraživanja materijala nakon zavarivanja u svrhu ocjene zavarenog spoja. Razvojem metalografije i pripadajućih softverskih programa omogućeno nam je da analizom dobivene mikrostrukture čelika ocijenimo njegovo stanje, procijenimo njegova svojstva te na temelju toga predvidimo eventualne probleme u eksploataciji ili daljnjoj tehnološkoj obradi [2].

2. ČELICI ZA IZGRADNJU CJEVOVODA

Čelici grupe X80 prema API 5L standardu spadaju u skupinu normaliziranih sitnozrnatih mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće a istovremeno imaju dobra mehanička svojstva i dobru zavarljivost. To je rezultat dugogodišnjeg razvoja čelika na području metalurgije i termomehaničke obrade. Primjenom ovih čelika smanjuju se nosivi presjeci kod jednakih opterećenja, odnosno smanjuje se masa i volumen konstrukcije, što dovodi do smanjenja ukupnih troškova materijala, ali isto tako i troškova zavarivanja.

Smanjenje udjela ugljika ispod 0,1% te mikrolegiranje s Nb, V ili Al u korelaciji s parametrima toplinske obrade rezultiralo je sitnozrnatom strukturom odličnih mehaničkih svojstava. Smanjen udio ugljika, mikrolegiranje i naposljetku termomehanička obrada značajno je povećala postizive granice razvalčenja. Unapređenje mehaničkih svojstava omogućuje smanjenje mase konstrukcije, povećanje dopuštenog opterećenja te pojeftinjenje same konstrukcije. X80 čelici se svakodnevno primjenjuju za izgradnju cjevovoda te u manjoj mjeri i u off-shore postrojenjima. Za većinu današnjih zahtjeva za transport nafte i plina najčešće se koriste čelici gradacije X70 i X80 prema API 5L, dok se X90 i X100 polako uvode u primjenu. Obzirom da duljina i operativni tlak cjevovoda konstantno rastu razvoj čelika visoke čvrstoće znatno doprinosi smanjenju troškova pri izgradnji. U proteklih 30 godina jako su povećani zahtjevi za materijale od kojih se grade cjevovodi. Cjevovodi velikih promjera danas transportiraju većinu svjetske proizvodnje prirodnog plina i to na najekonomičniji i najsigurniji način [3]. U ukupne troškove izgradnje cjevovoda uključeni su troškovi zavarivanja, montaže, materijala te ostali troškovi. Kao primjeri čelika koji se najčešće koriste pri izgradnji cjevovoda, a u svrhu analize troškova izgradnje, uzeti su čelici prema API 5L normi gradacija X70, X80 i X100 [2]. Na slici 1 prikazani su okvirni troškovi po metru cjevovoda.



Slika 1. Procijenjeni troškovi po metru cijevovoda [2]

2.1. Općenito o čelicima visoke čvrstoće

Kod strojeva i vozila manja masa znači i manji utrošak energije potrebne za pogon također i smanjenje gubitka zbog inercijskih sila kod pokretanja i zaustavljanja itd. Nadalje, u razvoju čelika povišene čvrstoće nastojao se zadržati povoljan omjer $R_e/R_m(0,70...0,85)$, tzv. "plastična rezerva", tako da u slučaju preopterećenja prvo dolazi do plastične deformacije, a ne do iznenadnog loma. Zadržavanjem što nižeg %C i eventualno niskim udjelima legiranih elemenata zavarljivost ostaje zadovoljavajuća. Postojanje grešaka (dislokacija) u strukturi materijala osnovni je razlog što metali nemaju onu čvrstoću koju bi im omogućile visoke sile razdvajanja u elementarnoj rešetci. Dislokacija jednodimenzijaska ili linijska nesavršenost, odnosno narušena periodičnost strukture duž neke kristalne linije može biti pravocrtna ili spiralna [5]. Iako dislokacije snižavaju teoretsku čvrstoću one ipak omogućuju plastičnu deformaciju materijala pri određenom opterećenju. Stoga ukoliko želimo povišiti otpornost prema promjeni oblika (granica razvlačenja, vlačna čvrstoća) potrebno je otežati gibanje dislokacija, ali ne ga i potpuno dokinuti jer bi se tada izgubila sposobnost materijala za promjenom oblika (udarna radnja loma, istezanje, kontrakcija) [4].

Nadalje, čelici povišene i visoke čvrstoće prema [5], dijele se u slijedeće skupine:

- Sitnozrnati normalizirani s feritno-perlitnom mikrostrukturom; $360 < R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$
- Poboļjšani s mikrostrukturom popuštenog martenzita; $R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$
- Termomehanički obrađeni; $R_{p0,2} < 500 \text{ N/mm}^2$

Današnji čelici povišene čvrstoće su u pravilu sitnozrnati mikrolegirani. U literaturi se često pojavljuje engleska kratica HSLA (High Strength Low Alloyed), što u prijevodu znači visokočvrsti niskolegirani čelici [5].

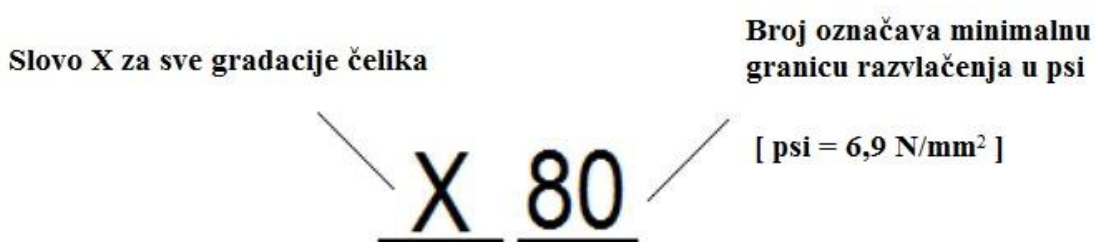
Mikrolegirani čelici povišene čvrstoće razvijeni su posljednjih tridesetak godina s ciljem da se smanji masa konstrukcija poput mostova, brodova, rezervoara, cisterni, cijevi pod tlakom i sl. Tehnologija mikrolegiranja omogućila je proizvodnju nove kategorije čelika, koji predstavljaju konvencionalne ugljične čelike sa minimalnim dodacima legirajućih elemenata (manje od 0,50%), radi povećavanja granice razvlačenja, čvrstoće i tvrdoće [4].

2.2. Klasifikacija čelika za cjevovode prema normama

Svojim specifičnim svojstvima čelici povišene čvrstoće odgovaraju zahtjevima koji su postavljeni pred materijal koji će se koristiti za izgradnju cjevovoda. Iz tih svojstava proizlazi njihov izbor pri odabiru vrste materijala za izgradnju cjevovoda. Strogi zahtjevi koji diktiraju odabir čelika za ovu vrstu eksploatacije, na neki način su odredili te još uvijek određuju područje istraživanja čelika visoke čvrstoće i potrebu za njihovom klasifikacijom i normizacijom. Detalji kemijskog sastava, mehanička i tehnološka svojstava bešavnih i šavnih cijevi propisani su standardima tj. normama. Čelici koji se koriste za izgradnju cjevovoda opisani su oznakama, kemijskim sastavom, mehaničkim i tehnološkim svojstvima u europskim i američkim normama. Pri projektiranju izgradnje cjevovoda potrebno je točno odrediti po kojoj normi se valja voditi, jer su propisane vrijednosti i naputci u europskim normama različiti od onih koje su propisane američkim normama. Nazivi i opisi u normi, kao i uočljive razlike oznaka i ostalih podataka između normi opisani su u narednim recima.

2.2.1. Američka norma API 5L

Norma koju je izdao American Petroleum Institute (API 5L– Specifikacija linijskih cjevovoda, 43rd Edition, 2004.) klasificira čelike za cjevovode, njihov kemijski sastav, mehanička svojstva te sva potrebna tehnološka svojstva. U normi se zasebno klasificiraju čelici za bešavne cijevi i čelici za šavne cijevi. Čelici za cjevovode se prema normi API 5L označavaju na način prikazan na slici 2 [2].



Slika 2. Označavanje čelika za cjevovode prema API 5L [2]

2.2.2. Europska norma EN 10208 - 2:2009

Europska norma EN 10208-2:2009 – Čelične cijevi za cjevovode za transport zapaljivih tekućina – Tehnički uvjeti isporuke – Dio 2: cijevi za zahtjev klase B (eng. Steel pipes for pipelines for combustible fluids – Technical delivery condition – Part 2: Pipes for requirement class B) zamijenila je prethodnu normu DIN 17712 koje je klasificirala čelične cijevi za cjevovode za transport zapaljivih tekućina i plinova [2]. Prema normi DIN 17712 razlikujemo neobrađene, normalizirane i termomehanički obrađene čelike za cjevovode, dok u normi EN 10208-2:2009 postoji klasifikacija između bešavnih cijevi i šavnih cijevi isto kao i prema normi API 5L. U tablicama koje daje norma navedeni su svi legirajući elementi u kemijskom sastavu čelika, te svi elementi koji nisu navedeni unutar norme ne smiju se dodavati u kemijski sastav čelika, jedino uz odobrenje naručitelja.

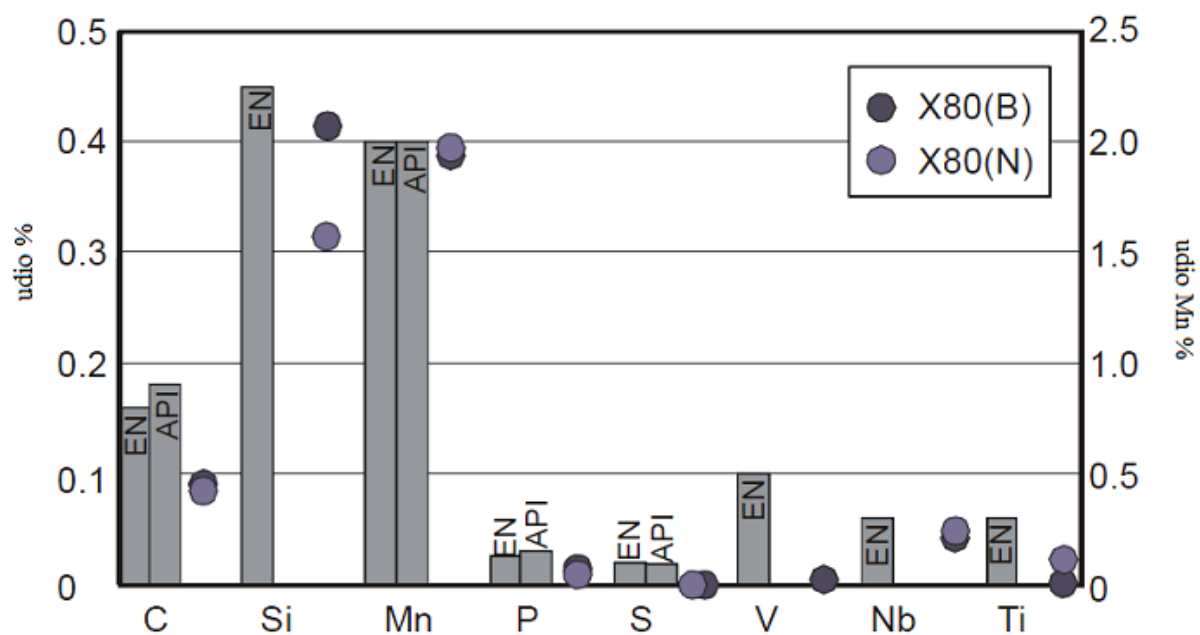
Čelici za cjevovode se prema normi EN 10208-2:2009 označavaju na slijedeći način [2]:

- Slovo L u oznaci čelika označuje da se radi o čelicima za cjevovode (eng. Pipeline steels) prema normi EN 10027-1, a slovna oznaka na kraju naziva označuje vrstu toplinske obradbe:
 - N – normalizirano,
 - Q – poboljšano,
 - M – termomehanički obrađeno.
- Iza slova L u nazivu čelika slijedi broj koji označuje minimalnu granicu razvlačenja za najtanju debljinu stijenke, toplinsku obradbu i zahtjev klase B.

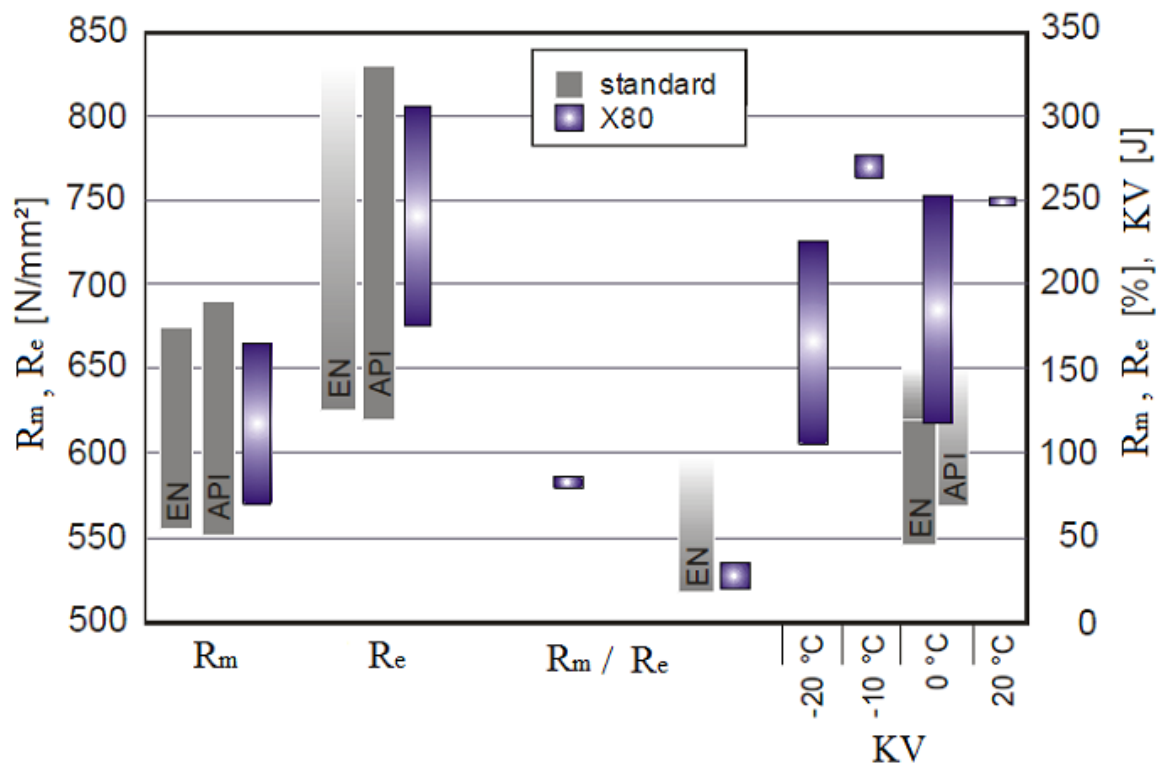
2.2.3. Razlike između norme EN 10208 - 2:2009 i API 5L

Različitost normi u kojima se mogu naći klasifikacije čelika za cjevovode, nameće određeni oprez u vidu konkretnog definiranja po kojoj normi će se odabrati čelik za cjevovode te se preporuča definiranje norme već u ranim fazama planiranja izgradnje cjevovoda. U normi DIN 17172 iz 1975. godine definiraju se niže granice udjela ugljika i mangana, dok norme EN 10208-2:2009 i API 5L sadržavaju maksimalne vrijednosti udjela.

Također, postoji bitna razlika između vrijednosti gornjih granica udjela ugljika u Europskoj normi u odnosu na Američku normu. Nadalje, u Američkoj normi API 5L udjeli silicija, vanadija, niobija i titana, koji su ključni u stvaranju disperzivnih karbida i nitrida, nisu detaljno određeni već ih definiraju proizvođači i/ili kupci [7]. Na slikama 3 i 4 prikazane su tipične razlike kemijskog sastava i mehaničkih svojstava čelika X80 prema normama API 5L i EN 10208-2.



Slika 3. Usporedba kemijskog sastava čelika X80 prema normama EN 10208-2 i API 5L uzorka čelika X80 [2]



Slika 4. Usporedba mehaničkih svojstava čelika X80 prema normama EN 10208-2 i API 5L uzorka čelika X80 [2]

2.3. Mehanizmi očvrsnuća

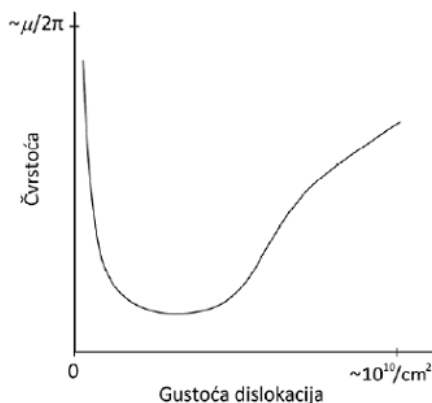
Da bi razumjeli putove prema povišenju granice razvlačenja i čvrstoće čelika i njihova današnja ograničenja, treba ponajprije uočiti potrebu istodobnog postojanja *otpornosti na promjenu oblika* i *sposobnost* (ograničene i lokalne) *promjene oblika* [8].

Metali nemaju onu čvrstoću koju bi im omogućile visoke sile razdvajanja u elementarnoj rešetci a osnovni razlog za to je postojanje strukturnih pogrešaka – *dislokacija* koje doduše smanjuju moguću čvrstoću ali su i uzrokom plastičnog deformiranja pod odgovarajućim opterećenjem. Imajući navedeno u vidu, potrebno je otežati gibanje dislokacija kako bi se povišila otpornost na promjenu oblika (R_e , $R_{p0,2}$, R_m), ali se ne smije potpuno spriječiti gibanje jer bi tada materijal izgubio sposobnost promjene oblika (KV, A, Z). Poznato je nekoliko mehanizama ili načina na koje je moguće očvrsnuti metalne materijale.

Povišenje čvrstoće ponajprije ovisi o mogućnostima modificiranja mikrostrukture. Svi načini povišenja čvrstoće temelje se na otežanom gibanju dislokacija nastajanjem prepreka.

Posljedica je obično povišenje granice razvlačenja dok vlačna čvrstoća ne mora rasti. Time se otežava plastično tečenje materijala što se očituje povišenjem granice razvlačenja. Kod očvrsnuća je potrebno postići optimalni kompromis između granice razvlačenja (čvrstoće) i duktilnosti materijala te je zato dislokacije potrebno učiniti teško pokretnima, ali ne i posve nepokretnima [5].

Maksimalne vrijednosti čvrstoće metala postižu se ili za izrazito mali broj dislokacija ili za vrlo veliki broj dislokacija ($>10^{10}$ cm/cm³) dok niske vrijednosti čvrstoće odgovaraju broju dislokacija $\sim 10^3$ do 10^5 cm/cm³ [2]. Na slici 5 shematski je prikazana ovisnost čvrstoće metala o gustoći dislokacija.



Slika 5. Shematski prikaz ovisnosti čvrstoće metala o gustoći dislokacija [2]

Osnovni mehanizmi očvršnuća, odnosno povišenja granice razvlačenja su slijedeći [7]:

- Očvršnuće kristalima mješancima (očvršnuće legiranjem),
- Očvršnuće martenzitnom transformacijom,
- Očvršnuće hladnom deformacijom,
- Očvršnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna),
- Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom)
- Očvršnuće disperzijom faza.

2.3.1. Očvršnuće kristalima mješancima (očvršnuće legiranjem)

Legiranje je otapanje jednog ili više elemenata u kristalnoj rešetci osnovnog elementa otapala. Kod ovog mehanizma očvršnuća otežavanje gibanja dislokacija temeljeno je na postojanju točkastih zapreka (atoma legiranih elemenata) otopljenih u rešetci osnovnog metala, čime nastaju intersticijski ili supstitucijski kristali mješanci. U slučaju legiranja ferita značajna je razlika u djelovanju intersticijskih elemenata (npr. ugljik, fosfor, dušik) u odnosu na supstitucijske (npr. molibden i krom). Intersticijski elementi uzrokuju jako očvršnuće, ali i veliku krhkost, a uz to im je topivost u feritu mala. Zato su nužni i supstitucijski dodaci (Mn, Mo, Cr, Ni) među kojima dovoljnu žilavost osiguravaju mangan i nikal. Na porast čvrstoće čelika najjače djeluje povišenje masenog udjela ugljika, a povoljno je i djelovanje dušika, no time opadaju svojstva duktilnosti. Od svih načina očvršnuća ovaj daje najmanje efekte [7].

2.3.2. Očvrnuće martenzitnom transformacijom

Očvrnuće martenzitnom transformacijom naziva se kaljenje. Martenzitnu transformaciju kod čelika i željeznih ljevova obilježava preklopna pretvorba austenita u martenzit koja uzrokuje očvrnuće uslijed stvaranja kristala mješanaca koji nastaju uslijed prisilnog otapanja ugljika u α -željezu (točkaste zapreke). Prisilna otopina ugljika u α -željezu (martenzit) postiže se brzim ohlađivanjem (gašenjem u vodi, ulju i sl.) kojim se sprječava difuzija ugljika iz austenitne (γ -željezo) BCC rešetke u kojoj je otopljen. Martenzit ima visoku čvrstoću zahvaljujući tetragonalnoj distorziji rešetke α -željeza (transformacija BCC u BCT rešetku) uslijed intersticijskog ulaza atoma ugljika. Rezultat je povećanje gustoće dislokacije deformacijom kristalne rešetke (očvrnuće umnažanjem dislokacija, linijskih zapreka). Martenzitnom transformacijom povišuje se tvrdoća i čvrstoća, ali pada istezljivost i žilavost pa je nužno dodatno provesti popuštanje [7].

2.3.3. Očvrnuće hladnom deformacijom

Ova mehanizam očvrnuća zasniva se na interakciji između samih dislokacija i dislokacija s drugim preprekama, što otežava njihovu pokretljivost. Dislokacije se unose u materijal pomoću hladnog plastičnog deformiranja. Što je viši stupanj deformacije veća je gustoća dislokacija i više su vrijednosti granice razvlačenja, ali se time znatno smanjuje žilavost materijala. Ovaj je mehanizam očvrnuća vrlo učinkovit s obzirom na sam iznos očvrnuća, međutim ako se pri unošenju novih dislokacija njihova gustoća približi graničnoj, nastupa koncentracija naprezanja koja vodi pojavi pukotina i loma. Na ovaj način posebno su očvrstili metali i legure s kubično plošno centriranom strukturom (npr. austenitni čelici, α -aluminijske i bakrene legure) [7].

2.3.4. Očvrnuće granicama zrna (usitnjenjem zrna)

Vrlo važan utjecaj granica zrna na granicu razvlačenja, odnosno ponašanje metala prilikom plastične deformacije, proizlazi iz činjenice da granice zrna predstavljaju barijeru klizanju dislokacija, čime dodatno sprječavaju njihovu pokretljivost i povećavaju granicu razvlačenja [7]. Mehanizam kočenja gibanja dislokacija pomoću granica zrna (površinskih zapreka) nije najefikasniji s obzirom na stupanj očvrnuća, ali je najprikladniji jer uz umjereno očvrnuće izaziva sniženje prijelazne temperature i povišuje žilavost [7].

Djelovanje granica zrna povoljnije je u odnosu na ostale vrste zapreka zbog toga što je broj dislokacija koje se gomilaju na velikokutnim granicama zrna ograničen i prije nego što se dostigne kritična gustoća koja bi mogla uzrokovati nastanak inicijalne mikropukotine, dolazi do procesa klizanja dislokacija preko granice u drugo zrno ako je ono povoljno orijentirano. Stoga su učinkovitija sitnija zrna, jer je time veća vjerojatnost povoljne orijentacije susjednih zrna. Mehanizam očvršnuća usitnjenjem zrna se obično kombinira s ostalim načinima očvršnuća [1].

2.3.5. Očvršnuće izlučivanjem (precipitacijom)

Izdvajanje fino disperzirane faze u osnovnoj strukturi metala kod precipitacijskog očvršćivanja obično je prilog očvršćivanju nastajanjem kristala mješanaca ili legiranjem. Doprinos precipitacijskog očvršćivanja proizlazi prije svega, iz prezasićene krute faze osnovne strukture. Pored toga, prisutnost čestica sekundarne faze u matrici osnovne strukture metala uzrokuje lokalizirana unutarnja naprezanja koja modificiraju svojstva metalne matrice. Za razumijevanje očvršćivanja putem precipitata mnogi se čimbenici trebaju uzeti u obzir. Oni uključuju veličinu, oblik, broj i raspodjelu čestica sekundarne faze, čvrstoću, duktilnost i ponašanje pri deformacijskom očvršćivanju matrice i sekundarne faze, kristalografsku podudarnost između faza i graničnu energiju te povezivanje među fazama. Općenito, precipitati sekundarne faze otežavaju gibanje dislokacija. Čvrstoća i tvrdoća povećavaju se s vremenom i veličinom čestica starenja, no moguće je i da se nakon određenog vremena starenja čvrstoća i tvrdoća počinju smanjivati [8].

2.3.6. Očvršnuće disperzijom faza

Legure se uspješno očvršćuju i dodatkom tvrdih čestica, kao što su oksidi, karbidi, nitridi, boridi i druge čestice u matricu osnovnog metala koje ometaju gibanje dislokacija. U disperzijski očvršnutim legurama nema koherencije između čestica i matrice. Očvršćivanje se zasniva na mehanizmu stvaranja prstena oko čestice sekundarne faze. Čvrstoća raste s povećanjem volumnog udjela i smanjenjem razmaka između čestica sekundarne faze. Ovaj mehanizam očvršćivanja ima manji potencijal u odnosu na mehanizam očvršćivanja kod kojeg dolazi do odrezivanja precipitata. S druge strane, mikrostruktura disperzijski očvršnute legure stabilnija je u odnosu na precipitacijski očvršnute legure jer nema okrupnjavanja i

rastvaranja na povišenim temperaturama pa su stoga ove legure pogodne za rad na višim temperaturama [8].

Očvršnuće materijala u principu rijetko uzrokuje samo jedan mehanizam, već je to interakcija njih nekoliko. Međutim ukupni efekt na očvršnuće nije uvijek jednak zbirnom učinku pojedinih mehanizama.

2.4. Razvoj čelika za cjevovode

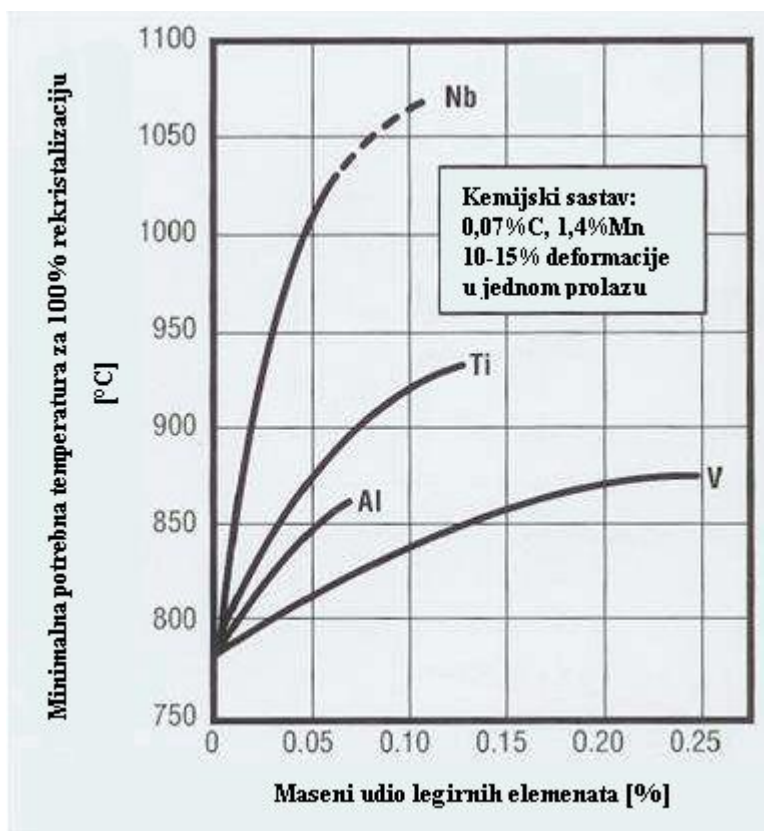
Istraživanje nafte i plina usko je povezano sa tehničkim i ekonomskim problemima njihovog transporta. Cjevovodi za transport nafte i plina su još uvijek najoptimalnije tehničko rješenje s pogleda ekonomičnosti i ekologije. Potreba za povećanjem čvrstoće čelika za izgradnju cjevovoda proizlazi iz činjenice da se zahtjevi u eksploataciji poput povećanog kapaciteta, sigurnosti, promjera, radnih tlakova i dr. konstantno povećavaju. Zahtjeve možemo ispuniti i zadovoljiti pod uvjetom da se poveća sama debljina stjenke cjevovoda, no na taj način bi povećali težinu cjevovoda, a time i troškove vezane uz njegovu izgradnju. Iz toga proizlazi konstantna potreba za unapređenjem i razvojem čelika visoke čvrstoće [2].

Mikrolegirani čelici niskog udjela ugljika prvi put se pojavljuju 30-ih godina prošlog stoljeća. Prvi mikrolegirajući elementi bili su vandij (0,005%) i titan (0,010%) dodavani su prvo svaki zasebno pa zatim i u kombinaciji kako su se povećavale čvrstoća i kako su metalurški procesi poboljšavali. Čelici su tada lijevani u ingote a izrađeni su od polusmirenih čelika u Siemens-Martin pećima. Današnji HSLA čelici izrađuju se od posebno smirenih čelika sa vrlo niskim, udjelom ugljika (manje od 0,2%) kontinuirano lijevani u čelične ploče te termomehanički obrađeni. Mikrolegiranje je upotrebljavano pri izradi čelika za brodske oplata, čelike za mostove, čelične grede a u čelike za cjevovode mikrolegiranje se uvodi od 50-ih godina prošlog stoljeća [10].

Utjecaj vanadija na normalizirane čelike bilježimo u njemačkoj literaturi oko 1945. god., dok je utjecaj niobija na povećanje čvrstoće toplo valjanih C-Mn čelika opisan u patentima i literaturi oko 1938. god. Sam mehanizam očvršnuća nije tada bio poznat ali je primijećen blagotvoran učinak Vanadijevih i niobijevih karbida i nitrda na smanjenje veličine zrna. Također nalazimo i literaturu u kojoj je ukazano na nedovoljnu udarnu radnju loma zbog formiranja mreže cementita oko granice feritnog zrna te zbog nastanka Widmanstattenovog ferita prilikom hlađenja na zraku. Poslije je također otkriveno da očvršnuće precipitacijom vanadijevih i niobijevih karbida može uzrokovati pad čvrstoće.

S vremenom otkriveno je da je probleme moguće riješiti povećanjem udjela mangana i smanjenjem veličine zrna tijekom toplog valjanja. Godine 1967. otkriveno je kako niobij povećava temperaturu rekristalizacije autenitnog zrna na temelju čega su razvijeni procesi prilikom termomehaničkog valjanja.

Na slici 6 vidljiv je utjecaj niobija i nekih elemenata na temperaturu rekristalizacije autenita. Lako je uočljivo kako od ponuđenih elemenata niobij ima najveću utjecaj na povišenje temperature rekristalizacije [10].



Slika 6. Utjecaj legirnih elemenata na temperaturu rekristalizacije

Proizvodnja čelika za cjevovode sredinom prošlog stoljeća sastojala se većinom od proizvodnje normaliziranog C-Mn čelika, gradacije X52 (prema API standardu) sa minimalnom granicom razvlačenja od 360 N/mm^2 . U narednim godinama (1968-1975) istraženi su bolje objašnjeni i kvantificirani mehanizmi očvršnuća te su ustanovljeni procesni režimi za mikrolegirane čelike.

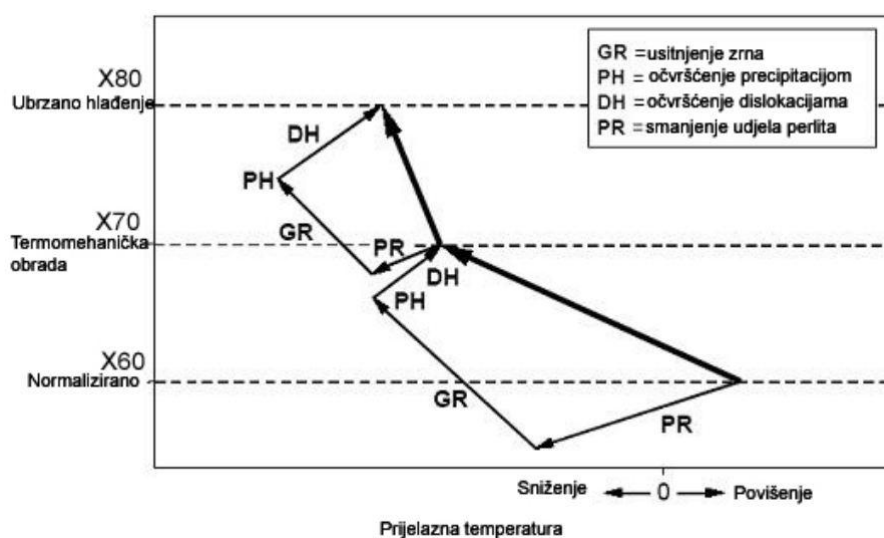
Nakon 1960. godine na tržištu se pojavljuju normalizirani ali mikrolegirani C-Mn čelici, gradacije X52 i X56. Nakon toga isključivo su se ove gradacije čelika koristile za izgradnju cjevovoda. Godine 1965. predstavljen je mikrolegirani normalizirani C-Mn čelik, gradacije X60 sa približno 0.20% ugljika [2]. Daljnji razvoj normaliziranog C-Mn čelika tada nije više bio moguć zbog opadanja tvrdoće svakim pokušajem dodatnog povećanja čvrstoće, a dodatno legiranje u svrhu povećanja čvrstoće također nije bilo moguće zbog opadanja zavarljivosti. Godine 1970. kao vrlo važan napredak u proizvodnji predstavljena je termomehanička obrada. Kemijski sastav termomehanički obrađenih čelika odlikovao se znatno manjim udjelom ugljika, malo višim udjelom mangana i silicija, te dodatkom mikrolegirajućih elemenata niobija i vanadija. Od godine 1973. godine, odnosno od 1977. godine čelici gradacije X60 i X70 postali su dominantni čelici za izgradnju cjevovoda [2].

Iako se očekivala veća količina uporabe čelika više gradacije u narednim godinama, značajnija uporaba čelika gradacije X80 ostvarila se tek 90-ih godina prošlog stoljeća. prema [10] upotreba čelika X-80 u najnovije doba eksponencijalno raste i to poglavito zbog izgradnje drugog po redu velikog Istog-Zapad Kineskog cjevovoda (ukupna dužina cjevovoda biti će 9250km) [10]. Tako da čelik X-80, potpomognut spoznajama dobivenim iz razvoja X100 i X-120 čelika, po instaliranoj kilometraži zauzima premoćan primat u odnosu na druge gradacije.

Razvojem i daljnjim napretkom u proizvodnji čelika X80 s niskim udjelom ugljika i mangana došlo se do saznanja da je sa svega 0.3% udjela kroma, u kombinaciji sa TMCP-om (*eng.* Thermomechanically controlled rolling process, *hrv.* Termomehaničko valjanje), moguće postići dovoljnu čvrstoću s tim da se zadrži dovoljno niska temperatura prijelaza žilavo-krhko [2]. Prvi zahtjevi za čelikom gradacije X100 pojavili su se 1994. godine, a prva laboratorijska verzija ove gradacije čelika izašla je 1995. godine, nakon čega su slijedila nužna ispitivanja

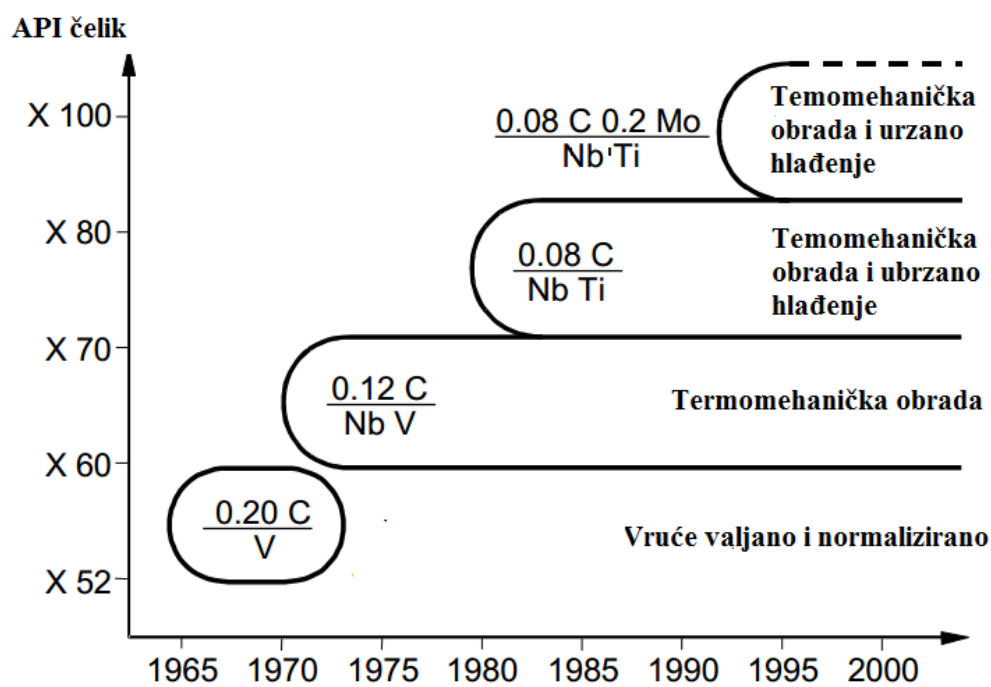
radi što bolje analize svojstava. Iako su izvršena mnoga ispitivanja i analize čelici gradacije X-100 ugrađeni su u tek nekoliko manjih sustava cjevovoda (jedan manji dio „Trans Canada pipeline system“ prema [10] ima čelik gradacije X-100) još čekaju svoju širu upotrebu.

Kod niskolegirani čelika se tijekom transformacije austenita pri hlađenju razvijaju granica zrna, izlučuju precipitanti i nastaju dislokacije, a na što se utječe brzinom hlađenja kao i završnom temperaturom hlađenja. Na slici 7 prikazan je način na koji se spomenutim mehanizmima očvršćivanja došlo od gradacije X60, preko gradacije X70 pa sve do gradacije X80 [3].



Slika 7. Mehanizam očvršćivanja za čelike X60, X70 i X80

Usitnjivanjem veličine zrna, istovremeno se povećava čvrstoća i snižava prijelazna temperatura. Gubitak čvrstoće nastao smanjenjem udjela perlita nadomješten je precipitacijskim očvršćivanjem i dislokacijama. Smanjenje udjela perlita, usitnjavanje zrna, očvršćavanje mehanizmom dislokacija i precipitacijom rezultiralo je kombinacijom svojstava gradacije X70 prema API 5L pri čemu je zadržana dobra zavarljivost i prihvatljive prijelazne temperature iz žilavog u krhko stanje. Daljnji razvoj prema gradaciji X80 dobiven je isključivo promjenom feritno – perlitne strukture u feritno – bainitnu. Kod čelika X80 još je više smanjen udio ugljika, usitnjeno je zrno te povećana gustoća dislokacija [2]. Na slici 9 prikazan je razvoj visokočvrstih čelika, te se može vidjeti kako dodatak molibdena, titana i nikla te termomehanička obrada omogućava povećanje čvrstoće do gradacije X100, uz to je vidljiv trend pada udjela ugljika kroz sve godine. Na slici 8 Prikazan je kronološki razvoj čelika za cjevovode.



Slika 8. Kronološki razvoj čelika za cjevovode

3. UTJECAJ METALURŠKIH TRANSFORMACIJA NA SVOJSTVA ČELIKA

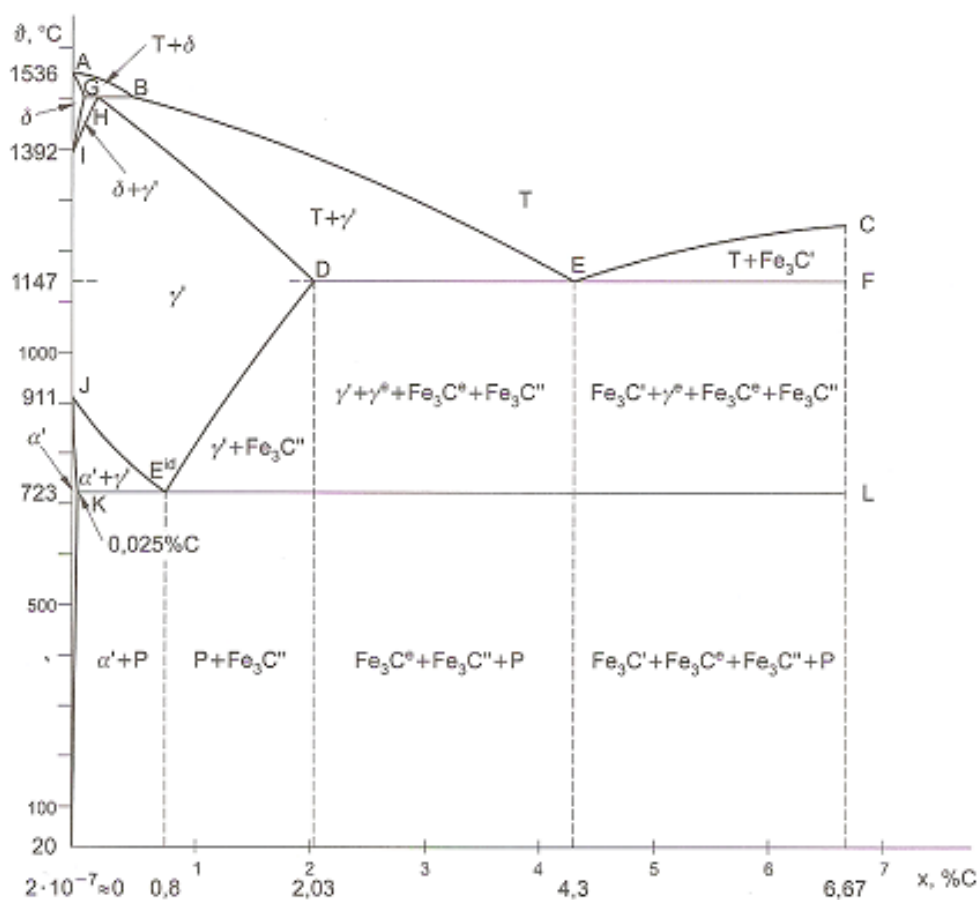
Višestruka i raznolika upotreba čelika proizlazi iz mogućnosti postizanja dobre kombinacije čvrstoće, žilavosti, rastezljivosti, deformabilnosti, toplinske stabilnosti itd. Svojstva čelika proizlaze iz njegove mikrostrukture. Kemijskog sastava, oblika i dimenzija poluproizvoda. Čelici visoke čvrstoće mogu biti podvrgnuti raznim mehanizmima očvršnuća u svrhu dobivanja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, no od proizvodnje pa do eksploatacije čelik prolazi kroz razne obrade koje bitno mogu narušiti ili pak poboljšati njegova svojstva. Da bi što bolje razumjeli postizanje određene mikrostrukture čelika visoke čvrstoće u narednim poglavljima biti će objašnjeni neki od glavnih pojmova usko vezanih uz metalurške transformacije čelika tijekom proizvodnje a i naknadno.

3.1. Mikrostrukturne faze čelika

Čelik je metastabilno kristalizirana legura željeza i ugljika ($\leq 2\% \text{C}$), uz prisutne pratioce (Mn, Si) i nečistoće (P, S, i ostali) i uz eventualni dodatak jednog ili više legiranih elemenata. Čelici se nakon lijevanja taljevine podešenog sastava u kalupe (kokile) oblikuju postupcima deformiranja (valjanjem, prešanjem, kovanjem i sl.) u željeni oblik poluproizvoda (limova, traka, šipki, cijevi, profila i sl [1]).

Binarni dijagram stanja željezo-ugljik jedan je od najvažnijih dijagrama u tehničkoj praksi. Legure Fe-C kristaliziraju metastabilno prema dijagramu stanja koji ima podeutektički, eutektički i nadeutektički dio (slika 9). Željezo je magnetski, sivo-bijele boje, duktilno, mekano i srednje čvrstoće.

Metastabilna kristalizacija nastaje pri realno sporom hlađenju Fe-C legura, pri kojem će ugljik koji nije otopljen u kristalima mješancima željeza (δ , γ , α) kristalizirati u obliku željeznog karbida Fe_3C , cementita. Primarna kristalizacija Fe-C legura iz taline je eutektička, a sekundarna kristalizacija je eutektoidna. Stabilna kristalizacija čistih Fe-C legura može nastupiti samo kod ekstremno sporog hlađenja. Ovisno o temperaturi i sastavu, atomi ugljika u tom slučaju ulaze u rešetku željeza tvoreći tako intersticijske kristale mješance (δ , γ , α) ili kristale grafita [11].



Slika 9. Dijagram stanja Fe - C za metastabilnu kristalizaciju [2]

Dijagram stanja nam dozvoljava da razlikujemo niz različitih stanja, pa tako možemo razlikovati kemijske spojeve, čvrste otopine i sl.. Za razumijevanje dijagrama stanja bitno je utvrditi alotropske oblike (intersticijske kristale mješance) u kojima se željezo pojavljuje tijekom hlađenja i zagrijavanja, a to su [11]:

- α – željezo – stabilno do temperature 911 °C,
- γ – željezo – stabilno u temperaturnom intervalu od 910 °C pa do 1390 °C,
- δ – željezo – stabilno iznad temperature 1 390 °C do temperature taljenja čelika.

U mikrostrukтури čelika mogu pojaviti slijedeće faze i pseudofaze [2]:

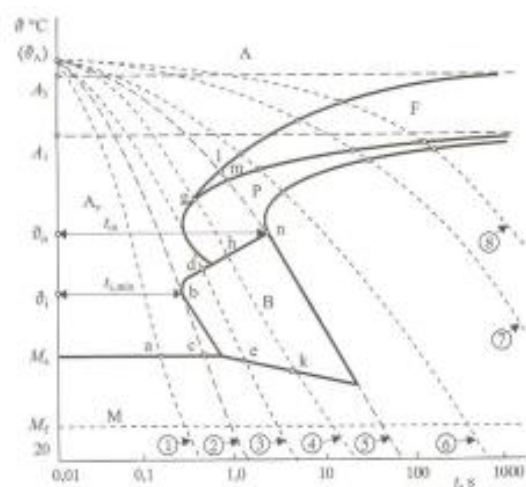
- Austenit (γ - željezo) - predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u površinski centriranoj kubičnoj rešetci (FCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u γ -Fe iznosi 2,06% kod 1147 °C. Na sobnoj temperaturi je nestabilan, ali se može pod određenim uvjetima dobiti i na sobnoj temperaturi. Tvrdća austenita je 170-220 HB te je vrlo žilav. Austenit ima najmanji specifični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika.
- δ -ferit (δ - željezo) - predstavlja krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza, nemagnetičan je, te se javlja odmah nakon skrućivanja, njegova maksimalna topljivost ugljika iznosi 0,09% C pri ~1456 °C.
- α -ferit (α - željezo) – predstavlja intersticijsku krutu otopinu ugljika u prostorno centriranoj kubičnoj rešetci (BCC) željeza. Maksimalna topljivost ugljika u α -Fe iznosi 0,025% kod 723 °C i samo 0,008% na sobnoj temperaturi. To je najmekša faza u dijagramu Fe-Fe₃C, tvrdoće oko 60 HB, ima visoku duktilnost.
- Cementit (Fe₃C) – metastabilan intermetalni spoj koji sadrži 6,67 mas.% ugljika, tvrd i krhak željezni karbid (tvrdoće oko 800 HV). Ima kompliciranu ortombsku rešetku, pravilno rasprostranjen doprinosi porastu tvrdoće čelika.
- Perlit - eutektoidna smjesa ferita i cementita koja sadrži 0,8% ugljika, te nastaje pri 723 °C vrlo polaganim hlađenjem. Lamelarna struktura perlita sastoji se od bijele feritne osnove ili matrice (koja čini većinu eutektoidne mješavine) i tankih pločica cementita.
- Ledeburit - eutektička mješavina austenita i cementita koja sadrži 4,3% ugljika te nastaje kod 1147 °C.
- Bainit - Kada se čelik hladi brzinom između gornje i donje kritične brzine hlađenja na nižim temperaturama (između temperature stvaranja perlita i martenzita) tada se dobiva struktura sastavljena od ferita i cementita, ali različita od perlita. To je struktura međustupnja ili međustruktura nazvana bainit. Brzina difuzije atoma ugljika na ovoj temperaturi tako je mala da se atomi ugljika ne mogu pomicati na veće udaljenosti i stvoriti lamele cementita. Zbog toga se umjesto lamela ferita i cementita stvaraju samo lamele ferita na čijim granicama se izdvaja cementit u obliku sitnih, kuglastih čestica.

- Martenzit – prezasićena kruta otopina ugljika u volumno centriranoj tetragonalnoj rešetci (BCT). Nastaje naglim hlađenjem (ovakva vrsta hlađenja naziva se još i kaljenjem, gašenjem) čelika austenitne mikrostrukture na određenu, dovoljno nisku temperaturu (M_s - temperatura početka stvaranja martenzita; M_f - temperatura završetka stvaranja martenzita) donjom kritičnom brzinom hlađenja. U mikrostrukтури takvog tzv. kaljenog čelika martenzit se javlja u obliku nakupina igličastih kristala, koji se sijeku pod određenim kutovima. Pretvorba je bezdifuzijska, zavisna samo o temperaturi, a ne i o vremenu (atermička reakcija). Nestabilan je, tvrd (728 HB) i krhak, te je odgovoran za veliku tvrdoću kaljenih čelika. Martenzit ima najveći specifični volumen u odnosu na sve mikrostrukturne faze čelika.

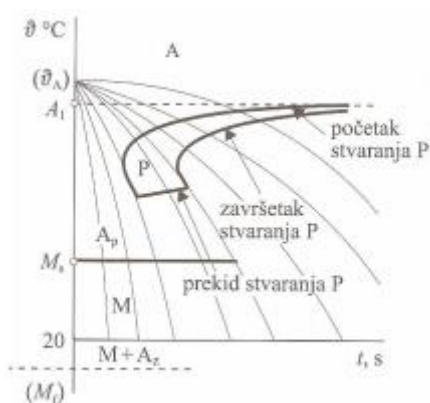
Najvažnije reakcije kod čelika odnose se na transformaciju iz austenitnog područja kod različitih brzina hlađenja. Kod veoma polaganog hlađenja (npr. hlađenje u peći) nastale mikrostrukture mogu se predvidjeti prema reakcijama u čvrstom stanju iz ravnotežnog faznog dijagrama. Ukoliko je hlađenje brže ovaj dijagram nije dostatan za pretpostavku o faznim transformacijama i nastalim mikrostrukturama [4].

3.1.1. Prikaz mikrostrukturnih pretvorbi pomoću TTT dijagrama

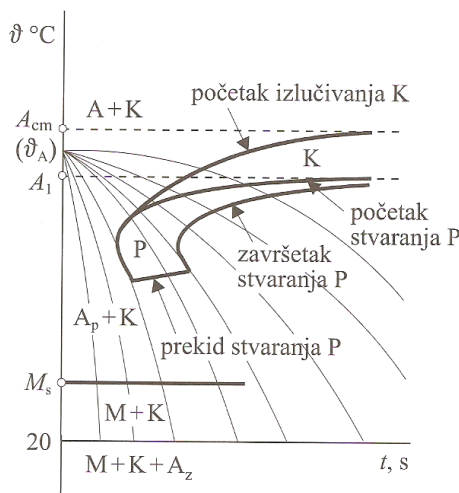
Predviđanje rezultata raspada austenita najčešće se temelji na TTT (Time-Temperature-Transformation) dijagramima koji su nezamjenjivi u jasnom prikazivanju mikrostrukturnih pretvorbi čelika. Na slikama 10, 11, i 12 prikazani su TTT dijagrami za podeutektoidni čelik ($0 < \%C < 0,8$), eutektoidni čelik ($\%C = 0,8$) i nadeutektoidni čelik ($0,8 < \%C < 2,3$) [3].



Slika 10. TTT dijagram za podeutektoidni čelik [2]



Slika 11. TTT dijagram za eutektoidni čelik [2]



Slika 12. TTT dijagram za nadeutektoidni čelik [2]

Ovisno o tome da li prikazuju raspad austenita u izotermičkim uvjetima ili pri kontinuiranom ohlađivanju, razlikuju se dvije vrste TTT dijagrama: izotermički TTT dijagrami za izotermičke uvjete pretvorbi te TTT dijagrami za kontinuirano ohlađivanje [2].

TTT dijagram za kontinuirano hlađenje služi samo za praćenje promjena pri neprekidnom (kontinuiranom) ohlađivanju [2]. Treba naglasiti da TTT dijagrami za kontinuirano hlađenje opisuju samo one mikrostrukturne pretvorbe koje se odvijaju uzduž krivulja ohlađivanja koje su korištene za izradu dijagrama. Iz toga proizlazi nedostatak primjene TTT dijagrama za kontinuirano hlađenje jer već i malo odstupanje krivulje stvarnog ohlađivanja od krivulja TTT dijagram za kontinuirano hlađenje može biti uzrok velikoj razlici rezultata mikrostrukturnih pretvorbi u ohlađenom izratku u odnosu na uzorak korišten za dobivanje dijagrama. Osim toga, pri predviđanju mikrostrukturnih pretvorbi primjenom TTT dijagrama za kontinuirano

hlađenje ne uzima se u obzir povijest toplinske obradbe i stanje materijala konkretnog izratka. Rezultati predviđanja mikrostrukturnih pretvorbi primjenom TTT dijagrama za kontinuirano hlađenje ukazuju na znatan utjecaj kemijskog sastava na raspad austenit [2].

Pothlađeni se austenit može transformirati i izotermički ako ga se brzo dovede na neku temperaturu ϑ_{izot} koja je veća od temperature M_s (temperatura stvaranja martenzita) i manja od temperature A_1 (temperatura pretvorbe $723\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ako je trajanje držanja na temperaturi ϑ_{izot} dovoljno dugo, doći će do izotermičke transformacije pothlađenog austenita. Struktura zbijanja pri takvoj transformaciji pothlađenog austenita prikazuju izotermički TTT dijagrami. Sve mikrostrukturne promjene tijekom ili nakon ohlađivanja čelika u literaturi se objašnjavaju pod pojmom metalurških transformacija čelika.

3.1.2. Metalurške transformacije čelika visoke čvrstoće

U narednim recima opisati ćemo postupke dobivanja čelika visoke čvrstoće i sve metalurške transformacije koje se javljaju ili se mogu javiti kod čelika visoke čvrstoće. Postupci dobivanja čelika u velikoj mjeri određuju daljnji tijek transformacija ove vrste u naknadnim obradama čelika. Najčešće korištena tehnologija za dobivanje cijevnih izradaka, u početku bila je tehnologija lijevanja, tom tehnologijom su se u to vrijeme izrađivale brončane cijevi. Početak proizvodnje željeznih cijevi tehnologijom lijevanja datira iz druge polovice 15. stoljeća. Godine 1738. Fayolle je praktično realizirao tehnologiju izrade olovnih cijevi lijevanjem. Današnje tehnologije oblikovanja cijevi uključuju primarni postupak tehnologije oblikovanja valjanjem.

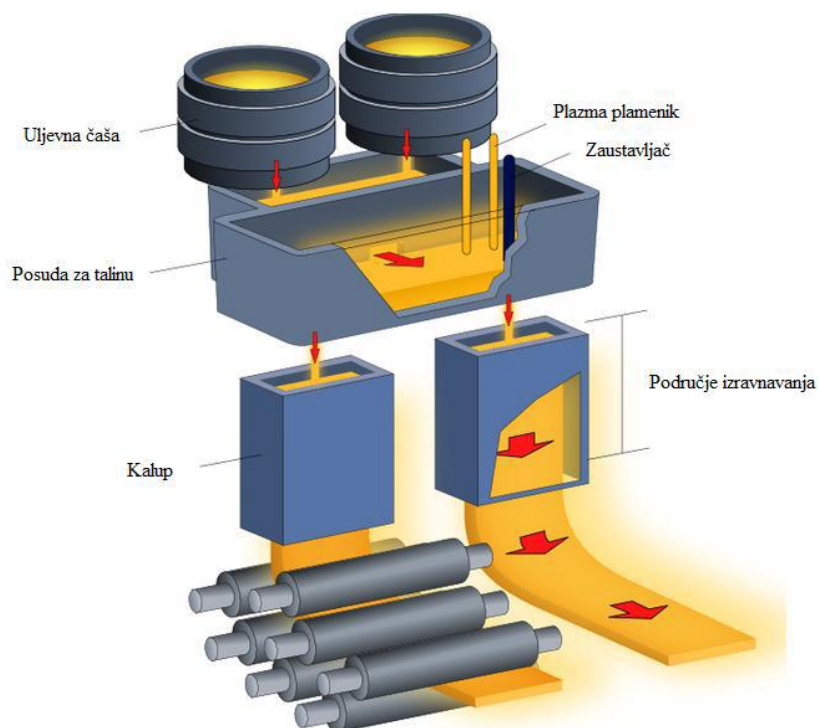
Do kraja osamdesetih godina razvoj proizvodnje čeličnih traka (za izradu cijevi) odvijao se u nekoliko faza. U prvoj fazi postupka lijevanja osnovna pozornost obraćena je na povećanju proizvodnosti i optimalizaciji kontinuiranog lijevanja, dok je u drugoj fazi prisutno toplo i hladno valjanje. Zahvaljujući primjeni sustava za reguliranje profila sustavno su se povećavale fleksibilnost proizvodnog postupka te kvaliteta [2]. Osim klasičnih postupaka proizvodnje konstrukcijskih čelika u drugoj polovici 20-og stoljeća razvijena je nova tehnologija koja obuhvaća i toplinsku obradu pa je takav postupak nazvan termomehanička obradba. Takvim načinom proizvedeni čelici već u valjanom stanju posjeduju povoljnu granicu razvlačenja i otpornost prema krhkom lomu. Danas razlikujemo dva načina proizvodnje čelika za cijevi. Jedan je način tzv. kontinuirano lijevanje, a drugi predstavlja kombinaciju valjanja i toplinske obradbe i naziva se termomehanička obradba [2].

Postoje dvije tehnologije proizvodnje gotovih proizvoda postupkom kontinuiranog lijevanja, a one se sastoje od postupaka:

- Kontinuirano lijevanje – valjanje poluproizvoda – valjanje u gotov proizvod
- Kontinuirano lijevanje – valjanje.

Druga nabrojana tehnologija povoljnija zbog puno kraćeg proizvodnog postupka. Također, kod ove tehnologije deformiranje se izvodi samo jednim zagrijavanjem za razliku od tehnologije koja uključuje dva postupka valjanja, odnosno zagrijavanje na dvije temperature valjanja. Proces dobivanja gotovog proizvoda iz ljevačkog poluproizvoda postupkom kontinuiranog lijevanja i valjanja se sastoji od zagrijavanja na temperaturu valjanja, deformiranja (valjanje ili kovanje) te hlađenja na sobnu temperaturu (slika 13) [2].

Slika 13 prikazuje kontinuirani ili neprekinuti lijev.



Slika 13. Neprekinuti ili kontinuirani lijev [2]

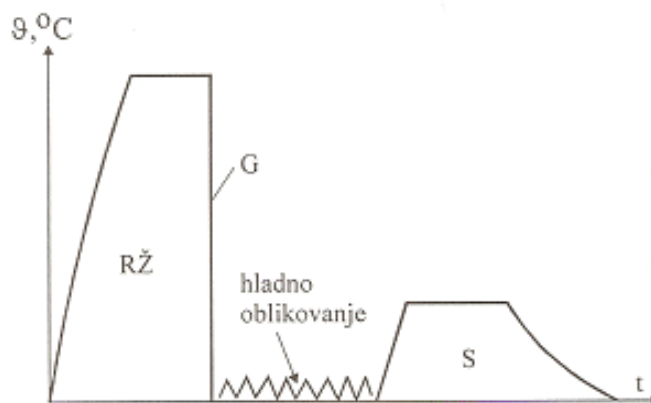
Plastična obrada može promijeniti distribuciju (raspodjelu) strukturnih pogrešaka i povišiti gustoću dislokacija, vakancija, nakupina, malokutnih i velikokutnih granica zrna itd. Pogreške kristalne rešetke vrlo jako utječu na oblikovanje mikrostrukture legura tokom faznih pretvorbi. Plastična se deformacija može primijeniti za oblikovanje optimalne strukture prije faznih pretvorbi ili za vrijeme njihovih odvijanja. U tom se smislu termomehanička obradba definira kao vrsta toplinske obradbe, u kojoj plastična obradba povišuje gustoću rešetaka i tako utječe na oblikovanje strukture pri faznim pretvorbama što se odvija u toku toplinskog djelovanja [13].

Termomehanička obrada svoju fizikalnu osnovu nalazi u činjenici da je broj klica kristalizacije ferita konstantan po jedinici duljine austenitnog zrna. Prema tome kako bi postigli što sitnije feritno zrno treba što prije osigurati što sitnije austenitno zrno, tj. što veću ukupnu duljinu granica tj. što veći broj kristalizacijskih klica ferita [2].

Prema [13] razlikujemo dvije vrste termomehaničke obradbe:

- visokotemperaturna termomehanička obradba (VTMO)
- te niskotemperaturna termomehanička obradba (NTTMO).

Niskotemperaturna termomehanička obradba (slika 14) je najstarija termomehanička obradba precipitacijski očvrstivih legura, kojom se težilo ponajprije povišiti svojstva čvrstoće. U tim postupcima legura se na uobičajen način gasi nakon toga podvrgava se hladnom deformiranju te konačno slijedi starenje [13].



Slika 14. Uopćeni dijagram postupka NTTMO (RT – rastvorno žarenje; G – gašenje; S - starenje) [2]

Legura nakon NTTMO i starenja ima viša svojstva čvrstoće, ali nižu duktilnost. Efekt očvršnuća putem NTTMO tumači se dvama uzrocima [13]:

- Hladno oblikovanje uzrokuje hladno očvršnuće, pa iduće očvršnuće precipitacijom počinje od više početne čvrstoće legure,
- Hladna deformacija sama pojačava intenzivnost precipitiranja.

Hladno deformiranje povećava gustoću nesavršenosti kristalne rešetke te ih čini termodinamički manje stabilnima, pa im se ubrzava starenje. Iz ovoga slijedi tumačenje općeg utjecaja hladnog oblikovanja na jače očvršnuće starenjem. No ipak treba još uzeti u obzir da na konačni efekt očvršnuća djeluju i uvjeti gašenja, deformiranja i starenja, priroda legure i vrsta precipitata [13].

Danas razlikujemo nekoliko klasičnih postupaka niskotemperaturne termomehaničke obradbe čelika, a one su :

- Postupak ISOFORMING,
- Postupak PERLIFORMING,
- Postupak AUSFORMING,
- Postupak TRIP,
- Postupak MARFORMING.

Visoko temperaturna termomehanička obradba (VTTMO) sastoji se od tople deformacije, reguliranog hlađenja nakon deformacije (nadkritičnog, međukritičnog ili podkritičnog hlađenja), te starenja ili popuštanja što je prikazano na slici 15 [13].



Slika 15. Dijagram postupka visokotemperaturne termomehaničke obradbe [2]

Svrha je VTTMO-a oblikovanje prezasićene otopine s nekristaliziranom strukturom nakon tople deformacije i gašenja (hlađenja), tj. strukturom visoke gustoće dislokacija i granica podzrna. Legura takve strukture postiže bolja mehanička svojstva pri idućem starenju. Da bi VTTMO bila realno primjenjiva, treba dakle, ispunjavati sljedeće uvjete [13]:

- a) Rekristaliziranu strukturu na kraju toplog oblikovanja,
- b) Spriječenu rekristalizaciju nakon toplog oblikovanja,
- c) Što višu prezasićenost radi idućeg starenja.

VTTMO se primjenjuje za konstrukcijske čelike povišene čvrstoće (HSLA čelike) [13]. Plastično se oblikovanje izvodi u području stabilnog austenita, a svrha je, prije svega, usitniti zrna jer usitnjenje zrna jedini je do sada poznati mehanizam koji istodobno povišuje vlačnu čvrstoću (R_m), konvencionalnu granicu razvlačenja ($R_{p0.2}$) i žilavost (KV) [13]. Naprezanje prilikom oblikovanja unosi u čelik nove dislokacije koje na visokim temperaturama oblikovanja lako putuju. Uz dovoljno visoki stupanj deformacije dolazi do dinamičke rekristalizacije austenita, što intenzivno usitnjuje zrna. Preciznim reguliranjem parametara VTTMO-a moguće je postići visoku konvencionalnu granicu razvlačenja i što sitnije zrna, iz čega proizlaze i glavne prednosti ove obradbe.

Razlikujemo dva postupka visokotemperaturne termomehaničke obradbe čelika (regulirano valjanje), a to su [13]:

- VTTMO čelika s reakcijom $A \rightarrow (F+K)$,
- VTTMO čelika s reakcijom $A \rightarrow (B+M)$ i $A \rightarrow M$,

gdje slovne oznake označuju pojedine strukturne faze i to na slijedeći način:

- A označuje strukturnu fazu austenita,
- F označuje strukturnu fazu ferita,
- K označuje strukturnu fazu karbida,
- B označuje strukturnu fazu bainita,
- M označuje strukturnu fazu martenzita.

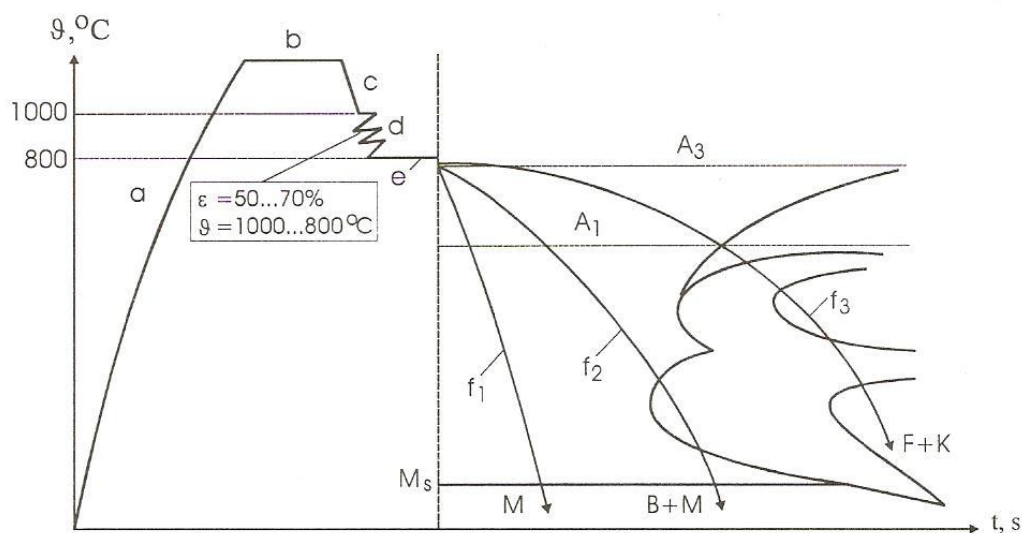
VTTMO čelika s reakcijom $A \rightarrow (B+M)$ i $A \rightarrow M$ primjenjuje se na čelike povišene prokaljivosti, odnosno visoke prokaljivosti [13].

Sa gledišta termomehaničke obradbe čelika visoke i povišene čvrstoće, odnosno čelika za cjevovode najznačajnija je VTTMO čelika s reakcijom $A \rightarrow (F+K)$. Dakle, ovaj se postupak s umjerenom 'brzinom' hlađenja nakon toplog oblikovanja (podkritično hlađenje) primjenjuje na normalizirane sitnozrnate mikrolegirane čelike povišene čvrstoće (HSLA čelici). Optimalna kombinacija mehaničkih svojstava postiže se [13]:

- Uz $< 0,2\%C$ (zbog zavarljivosti),
- Uz udio disperzoidnih karbidotvoraca (Nb, V, Ti),
- Uz eventualni udio uključinskih legirajućih elemenata (Zr, Ce, La),
- Uz dovoljan udio Mn ($\approx 1,8\%$) radi očvršnuća ferita otapanjem mangana.

Na slici 16 prikazani su postupci visokotemperaturne termomehaničke obradbe, odnosno reguliranog valjanja čelika, a slovne oznake sa slike označuju [16]:

- a – ugrijavanje na temperaturu homogenizacije austenita,
- b – držanje radi homogenizacije,
- c – hlađenje na početnu temperaturu oblikovanja,
- d – oblikovanje (valjanje, kovanje, izvlačenje),
- e – eventualno držanje nakon oblikovanja,
- f1 – kaljenje na martenzit,
- f2 – kaljenje na martenzit + bainit
- f3 – hlađenje na ferit + perlit (čelici visoke čvrstoće - HSLA).



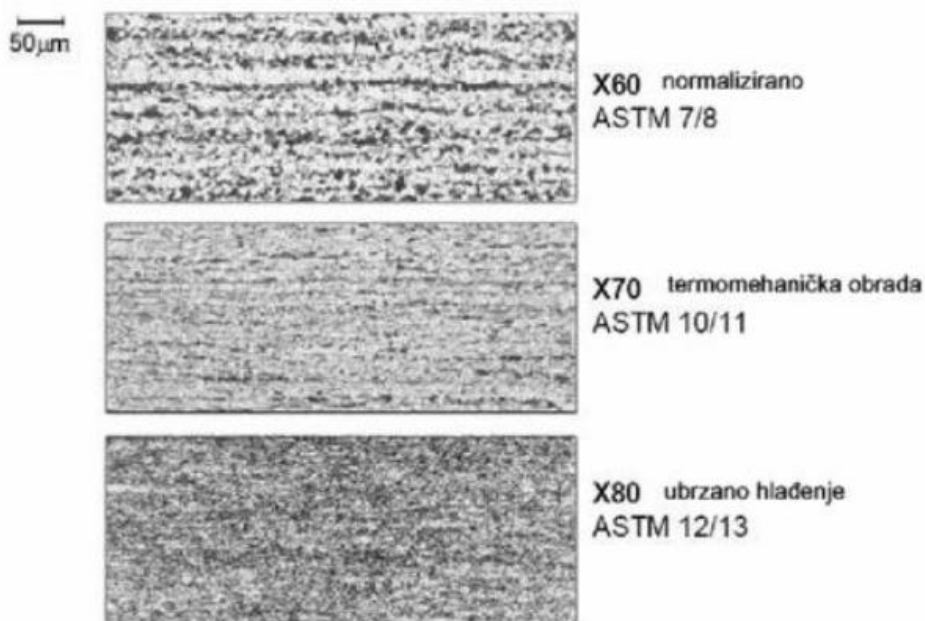
Slika 16. Postupci reguliranog valjanja čelika [13]

Veličina zrna je vrlo važan utjecajni čimbenik na čvrstoću, a na žilavost posebice. Termomehanička obrada a posebice valjanjem ima za cilj smanjenje veličine zrna. Završna temperatura valjanja u termomehaničkom procesu, uz kemijski sastav čelika, također utječe na završnu veličinu zrna. Sitnozrnatu strukturu moguće je postići ako je valjanje izvršeno na temperaturi koja je nešto viša od temperature $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije.

3.2. Mikrostrukturne faze čelika za cjevovode

Razvoj čelika za cjevovode usko je vezan uz razvoj i poboljšanje mikrostrukture. Čelik se razvijao od normaliziranih čelika gradacije X60 sa 0,2% C, preko čelika gradacije X70 s maksimalno 0,12% C pa sve do razvoja prema gradaciji čelika X80 čija je feritno- bainitna struktura dobivena smanjenjem udjela ugljika, usitnjenjem zrna te povećanjem gustoća dislokacija.

Čelik X60 ima normaliziranu trakastu feritno-perlitnu mikrostrukturu i veličinu zrna 7/8 po ASTM E112/96 normi. Struktura čelika X70 je ujednačena, a zrno veličine 10/11, dok čelik X80 ima feritno – bainitnu strukturu veličine zrna 12/13, slika 17.



Slika 17. Tipične mikrostrukture i veličine zrna čelika X60, X70 i X80 [3]

3.3. Utjecaj legirnih elemenata na svojstva čelika

Najčešće prisutni legirajući elementi u čelicima su krom, nikal, mangan, silicij, volfram, vanadij i molibden. U posebnim slučajevima čelik se može legirati kobaltom, titanom, aluminijem, niobijem i dr. Legirajući elementi se u čeliku pojavljuju u obliku:

- otopljeni u α -željezu ili γ -željezu,
- kao spojevi (karbidi, intermetalni spojevi),
- kao nemetalni uključci (oksidi, nitridi, sulfidi, fosfidi).

Poznato je da niti jedna skupina materijala ne može legiranjem toliko mijenjati svojstva kao čelik. Čeliku se dodaju određeni elementi kako bi se postiglo željeno svojstvo ili kombinacija svojstava gotovog proizvoda.

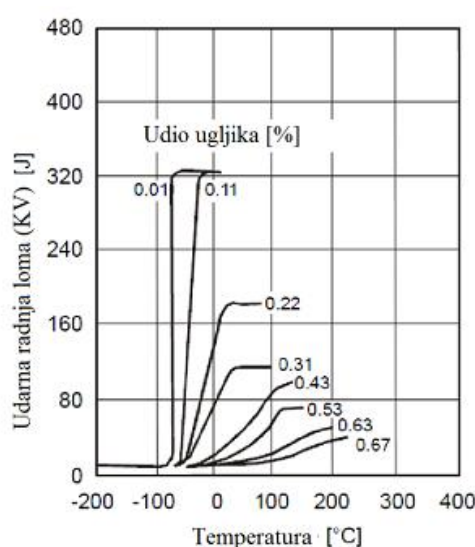
S obzirom na afinitet prema ugljiku legirajući elementi se mogu podijeliti na karbidotvorce (npr. krom, volfram, molibden, vanadij, titan, niobij, tantal) i nekarbidotvorce (npr. nikal, mangan, kobalt). Karbidotvorci se najčešće spajaju s ugljikom u karbide Cr_7C_3 , Cr_{23}C_6 , W_2C , WC , Mo_2C , VC , V_4C_3 , TiC , TaC , NbC , Fe_3C td., ali mogu također dijelom supstituirati u kristalnu rešetku željeza te stvarati intermetalne spojeve (npr. FeCr , Fe_2Mo i dr.) [2].

Prema utjecaju na dijagram stanja Fe-C legirajući elementi se dijele na one koji proširuju područje austenita i zovu se gamageni elementi i one koji proširuju područje ferita pa ih nazivamo alfageni elementi. Područje austenita uglavnom proširuju nikal, mangan, kobalt itd. Legirajući elementi koji proširuju područje ferita najčešće su krom, volfram, molibden i vanadij [2]. Utjecaj pojedinih legirajućih elemenata na svojstva čelika biti će pojašnjena u narednim podpoglavljima.

3.3.1. Legiranje ugljikom (C)

Ugljik zapravo 'pripada' čeliku, pa se obično i ne smatra legirajućim elementom, no za većinski broj čelika on je najvažniji element i utječe najjače na svojstva čelika. U čeliku može biti sadržan od nekoliko stotinki postotaka do približno 2%. S povišenjem udjela raste čvrstoća i granica razvlačenja, a snižava se duktilnost (žilavost, razvlačenje i kontrakcija presjeka) [13]. Povećanjem udjela ugljika raste udio perlita u strukturi čelika, a s time se povećava i vlačna čvrstoća. Granica razvlačenja, povećanjem udjela ugljika, raste manjim

intenzitetom nego vlačna čvrstoća iz razloga što gibanje dislokacija počinje tek nastankom feritnog zrna [6]. Posljednjih godina, udio ugljika u nekim feritno-perlitnim čelicima je drastično smanjen sa 0,28 % ili 0,20 % na svega 0,12 % pa i niže [6]. Nedostaci uzrokovani smanjenjem udjela ugljika nadomještaju se legiranjem drugim legirajućim elementima. Nizak udio ugljika u čeliku povećava udarnu radnju loma do gornjih graničnih vrijednosti, te snižava prijelaznu temperaturu što za posljedicu ima smanjenje udjela perlita u strukturi čelika [8]. Na slici 18 prikazan je utjecaj ugljika kao legirajućeg elementa na udarnu radnju loma u ovisnosti o temperaturi.



Slika 18. Utjecaj ugljika na udarnu radnju loma u ovisnosti o temperaturi [8]

Ugljik kao legirajući element u čeliku, zajedno sa niobijem, ima najvažniju ulogu u održavanju svojstava čvrstoće, žilavosti, zavarljivosti, osjetljivosti nastajanju pukotina u zoni utjecaja topline i sklonosti nastajanju vodikove krhkosti te napetostne korozije [6].

3.3.2. Legiranje silicijem (Si)

Silicij je jak dezoksidans pa se kao takav upotrebljava pri proizvodnji čelika za dezoksidaciju. Također povišuje čvrstoću i otpornost na trošenje a najjače djelovanje ima na povišenje granice razvlačenja [3]. Silicij ima jak afinitet prema stvaranju oksida što za posljedicu ima smanjenje mogućnosti pojave pora. Viši udjeli silicija potiču stvaranje ferita i u isto vrijeme utječu na smanjenje udjela perlita što rezultira smanjenjem čvrstoće [6].

3.3.3. Legiranje manganom (Mn)

Mangan snižava temperaturu transformacije austenita, što znači da pri završetku postupka valjanja u strukturi ostaje samo sitnozrnati austenit koji se naknadnim hlađenjem transformira u ferit i karbid. To za posljedicu ima povećanje čvrstoće i žilavosti [6]. Dodatak svakih 1% mangana može dovesti do povišenja granice razvlačenja konstrukcijskih čelika za oko 100 N/mm²[5]. Ukoliko je sadržaj mangana veći od 12%, čelici poprimaju austenitnu mikrostrukturu neovisno o sadržaju ugljika [2].

3.3.4. Legiranje dušikom (N)

U većini slučajeva dušik u željezu predstavlja nepoželjni element (nečistoću), ali se ponekad dodaje i kao legirajući element. Već 0,01% dušika povisuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali smanjuje deformabilnost i žilavost čelika. Brzim hlađenjem dušik može ostati zarobljen u rešetci željeza. U nelegiranim i niskolegiranim čelicima nije poželjan jer povećava sklonost prema starenju, posebno kod hladno deformiranih čelika (deformacijsko starenje). Legiranjem dušikom može se zamijeniti dodatak određene količine vrlo skupog nikla. Dušik se kao legirajući element najčešće dodaje u količini do približno 0,25%.

3.3.5. Legiranje molibdenom (Mo)

Legiranjem s molibdenom (najčešće u kombinaciji s ostalim legirajućim elementima) povećava se prokaljivost i čvrstoća čelika, a sprječava pojava visokotemperaturne krhkosti popuštanja. Iz tog razloga, konstrukcijski čelici sadrže od 0,2 do 5% molibdena [4]. Molibden je karbidotvorac i povećava na otpornost na trošenje (npr. brzorezni čelici). Povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate mikrostrukture. U kombinaciji s kromom molibden povećava otpornost čelika prema općoj i jamičastoj koroziji.

3.3.6. Legiranje vanadijem (V)

Vanadij usporava rast austenitnog zrna pri povišenim temperaturama. Budući je vanadij jak karbidotvorac i nitridotvorac u udjelima iznad 0,4% povisuje otpornost na trošenje stvaranjem stabilnog karbida VC ili V₄C₃. Legiranjem vanadijem u kombinaciji sa niobijem mogu se postići visoke čvrstoće čelika [6].

3.3.7. Legiranje niobijem (Nb)

Budući da je niobij izrazito jak karbidotvorac uglavnom se primjenjuje za stabilizaciju čelika postojanih na djelovanje kiselina. Niobij pored karbida može stvarati nitride i karbonitride, potpomagati nastanak sitnijeg zrna u čeliku i olakšavati precipitacijsko očvršćavanje. Kao legirajući element niobij se dodaje sa ili bez dodatka vanadija u zavarljive sitnozrnate čelike povišene granice razvlačenja i čvrstoće (HSLA čelici) te u neke ultračvrste PH-čelike [2]. Povišenje udjela niobija kao legirnog elementa ne doprinosi poboljšanju svojstava čelika, čak suprotno, povećani udio niobija može negativno utjecati na zavarljivost [8]. Legiranje niobijem u kombinaciji sa molibdenom mogu se postići visoke vrijednosti čvrstoće zbog stvaranja karbonitrida koji usporavaju gibanje dislokacija.

3.3.8. Legiranje titanom (Ti)

Titan zbog svog izraženog afiniteta prema kisiku, dušiku, sumporu i ugljiku djeluje izrazito dezoksidirajuće, denitrirajuće i desulfurirajuće. Vezanjem s ugljikom titan stvara vrlo stabilan karbid TiC pa se zajedno s niobijem i tantalom primjenjuje za stabilizaciju nehrđajućih čelika. Ukoliko se nalazi u većim udjelima može djelovati na precipitacijsko očvršćavanje stvaranjem intermetalnih spojeva Ni_3Ti ili $\text{Ni}_3(\text{Ti}, \text{Al})$ [2].

3.3.9. Legiranje ostalim legirajućim elementima

U zavisnosti od načina proizvodnje sumpor (S) u čelicima možemo naći u udjelu od 0,005 do 0,006%. Sumpor je glavni element odgovoran za pojavu segregacija (sulfida) u čeliku. Sulfid željeza (FeS) uzrokuje pojavu “crvenog” i “bijelog loma” a nastaje pri početnim temperaturama valjanja ili kovanja. Budući da talište sulfida FeS iznosi $985\text{ }^\circ\text{C}$, a topla prerada se provodi na temperaturi iznad $1000\text{ }^\circ\text{C}$, rastaljivanjem FeS dolazi do pojave “crvenog loma” i smanjenja žilavosti. Zbog svega navedenog se čelici s višim sadržajem sumpora ne mogu deformirati u toplom stanju. Štetan utjecaj FeS uklanja se dodatkom mangana i stvaranjem sulfida MnS koji ima znatno višu temperaturu taljenja ($1610\text{ }^\circ\text{C}$) od temperature tople prerade čelika [2].

Udio fosfora (P) u čeliku trebao bi biti što niži (ispod 0.06%) [2]. Jedino u iznimnim slučajevima neki čelici mogu imati povišen sadržaj fosfora radi poboljšanja rezljivosti, te radi povišenja granice razvlačenja efektom precipitacije (kod korozijski postojanih austenitnih čelika). Smanjivanju udjela fosfora u čeliku treba težiti zato što fosfor u čeliku tijekom skrućivanja dovodi do pojave primarnih segregacija koje onda predstavljaju štetnu nehomogenost u strukturi [2]. Također, poznato je da je fosfor uzročnik krhkosti čelika.

Nikal (Ni) kao legirajući element proširuje područje austenita, te zbog vrlo slabog afiniteta prema ugljiku ne stvara karbide. Legiranjem s niklom može se povisiti žilavost konstrukcijskih čelika kao i korozijska postojanost (uz minimalno 12% kroma). U precipitacijski očvrnutim (PH) čelicima nikal stvara intermetalne spojeve Ni_3Ti i/ili Ni_3Al . Zbog ekonomskih razloga (visoka cijena) nikal se gotovo uvijek legira u kombinaciji s drugim legirajućim elementima [5].

Volfram (W) kao legirajući element pripada skupini karbidotvoraca. Volfram sprječava rast zrna, a time posredno utječe i na povišenje žilavosti čelika [2]. Volfram stvara karbide izrazito otporne na trošenje te predstavlja nužni legirajući element za brzorezne čelike.

Aluminij (Al) se najčešće koristi kao sredstvo za dezoksidaciju. Aluminij veže na sebe dušik i time smanjuje opasnost od pojave starenja. Jako sužava austenitno područje. Ne doprinosi poboljšavanju mehaničkih svojstava čelika [5]. Sposobnošću stvaranja nitrida aluminij predstavlja veoma važan legirajući element za nitriranje (stvara spoj AlN). Također, reakcijom aluminija s niklom ili titanom mogu nastati intermetalni spojevi Ni_3Al i Ni_3Ti [4].

Bakar (Cu) se rjeđe koristi kao legirajući element jer se pri visokim temperaturama nakuplja ispod površinskog sloja ogorine te uzrokuje površinsku osjetljivost tijekom kovanja ili valjanja (tzv. crveni lom). Dodatkom bakra može se povisiti omjer granica razvlačenja/vlačna čvrstoća. Ako ga ima iznad 0,4% tada omogućava precipitacijsko očvršćavanje.

Kobalt (Co) ne stvara karbide ali povoljno utječe na sprječavanje rasta zrna pri visokim temperaturama. Zbog poboljšavanja vlačne čvrstoće i postojanosti na popuštanje pri povišenim temperaturama kobalt se dodaje brzoreznim, alatnim i konstrukcijskim čelicima koji su namijenjeni za rad pri povišenim temperaturama [2].

3.3.10. Mikrolegiranje čelika visoke čvrstoće

Povećanje čvrstoće čelika, uz istovremenu uštedu legirajućih elemenata, ostvaruje se primjenom postupka mikrolegiranja. Mikrolegiranje se koristi prvenstveno kod izrade konstrukcijskih čelika koje karakterizira visoka granica razvlačenja, zadovoljavajuća plastičnost, neznatna sklonost krhkom lomu te dobra zavarljivost. Razlika u odnosu na uobičajen sastav konstrukcijskih čelika je u relativno niskom sadržaju ugljika i dodatku mikrolegirajućeg elementa [2].

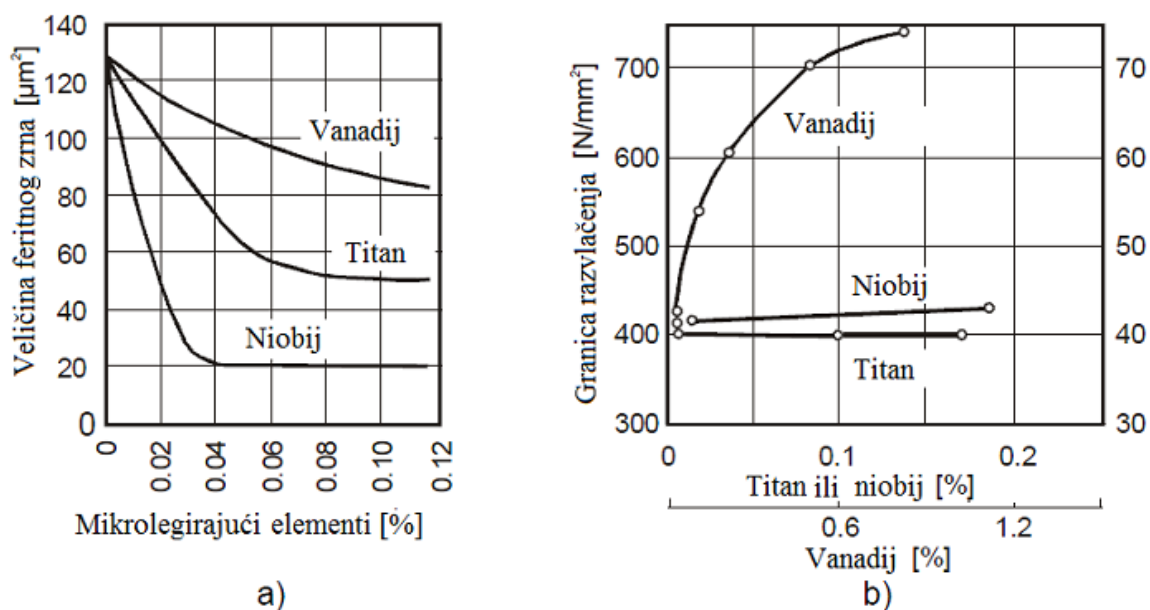
Osnovna razlika između mikrolegirajućih i ostalih legirajućih elemenata u čeliku uočava se na osnovi njihova sadržaja u leguri (gornja granica koncentracije mikrolegirajućih elemenata izražava se u desetom dijelu postotka). Mikrolegirajući elementi u čeliku se ili vežu prateće elemente ili se izlučuju u drugoj fazi u osnovnu matricu čelika. Djelovanje mikrolegirajućih elemenata u čeliku je raznovrsno. Oni mogu stvarati kristale mješance (čvrste otopine) ili spojeve kao što su nitridi, karbidi i karbonitridi. Dodatak mikrolegirajućih elemenata koji stvaraju karbide i nitride (kao npr. niobij, vanadij, titan) značajni su u primjeni pri povišenju čvrstoće čelika. Njihov učinak ostvaruje se kroz usitnjenje zrna i precipitaciju (očvršćavanje izlučenim česticama). Na taj način nadomješta se pad čvrstoće zbog sniženja udjela ugljika, odnosno udjela perlita [2].

Pretpostavlja se da mikrolegirajući elementi dovode do očvršćavanja uslijed stvaranja čestica (precipitata), koje nastaju difuzijom mikrolegirajućih elemenata (uključujući dušik i ugljik) u područje iz kojeg je izdifundirala određena količina željeza [2].

Mikrolegirajući elementi utječu na [2]:

- povišenje tvrdoće ferita zbog nastanka kristala mješanaca,
- povišenje tvrdoće ferita zbog izlučenih čestica,
- smanjenje veličine zrna ferita zbog usporavanja (kašnjenja) i pothlađenja $\gamma \rightarrow \alpha$ transformacije (zbog otopljenih čestica u austenitu),
- smanjenje veličine zrna zbog nastanka klica (u austenitu izlučenih spojeva),
- smanjenje veličine zrna zbog “koćenja” rekristalizacije austenita.

Za visokočvrste zavarljive čelike modernog doba karakteristično je mikrolegiranje s niobijem, vanadijem, titanom ili nekim drugim mikrolegirajućim elementom. Legiranje vanadijem, niobijem i titanom rezultira u najvećoj mjeri, povišenjem čvrstoće ali i usitnjenjem zrna (slika 21). Upravo ova svojstva rezultat su stvaranja precipitata u optimalnom području toplog oblikovanja te zatim očvršćenja precipitata i spriječavanja rekristalizacije. Najbolja svojstva u smislu povišenja čvrstoće možemo postići ako legiranje provodimo s ugljikom i fosforom, dok legiranje s ugljikom, silicijem i kromom povisuje vlačnu čvrstoću. Dodavanjem legiranih elemenata kao što su fosfor, mangan i bakar moguće je postići povećanje granice razvlačenja. Mangan, čije je legirajuće djelovanje slično niklu, ima svojstvo povišenja žilavost ferita i poboljšanja zrna te se dodaje u udjelu 2 % [6]. Za neke feritno perlitne čelike za cjevovode kao legirni element u udjelu od 0,30% dodaje se molibden, a za veće debljine čelika kao dodatni legirajući element dodaje se nikal u sličnom udjelu kao i molibden [8]. Slika 19 prikazuje utjecaj legiranih elemenata (V, Ni, Ti) na granicu razvlačenja i veličinu zrna.

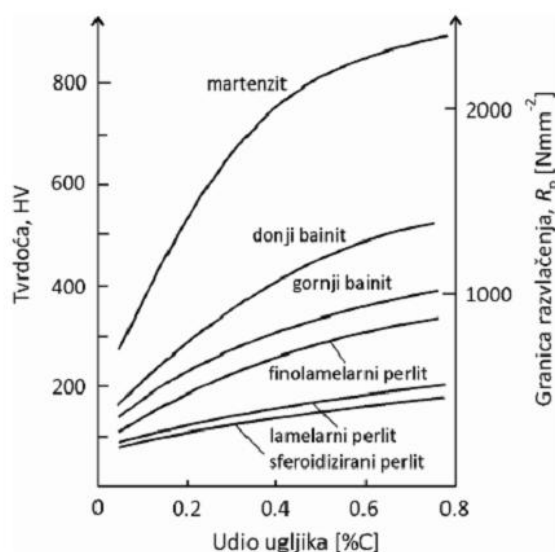


Slika 19. Utjecaj legiranih elemenata niobija, vanadija i titana na veličinu feritnog zrna (a) i na granicu razvlačenja (b) [2]

3.4. Utjecaj mikrostrukture na mehanička svojstva čelika

Osnovno obilježje mehaničkim svojstvima čelika daju mikrostrukturni sastojci od kojih je čelik sastavljen. Ipak, kad se govori o povezanosti mikrostrukture i mehaničkih svojstava čelika treba imati u vidu i druge čimbenike koji mogu utjecati na mehanička svojstva, poput: legirajućih elemenata, veličine kristalnih zrna, unutarnjih naprezanja, heterogenosti mikrostrukture i kristalnih nesavršenosti [2].

Pri gašenju čelika dolazi do raspada austenita u sekundarne faze koje se mogu svesti na dvije osnovne: α -fazu te željezni karbid (cementit). Kemijski sastav cementita se ne mijenja bez obzira da li se cementit nalazi u sastavu perlita ili bainita, već se mijenjaju oblik te dimenzije cementita o kojima ovise njegova mehanička svojstva. Za razliku od cementita, ovisno o mikrostrukтури koju gradi, α faza mijenja oblik, dimenzije te sadržaj ugljika koji ovisi o temperaturi nastanka α -faze, dok kod martenzita ovisi o sadržaju ugljika u čeliku. Stoga, mehanička svojstva α -faze ovise o njezinom obliku, dimenzijama te kemijskom sastavu [2]. Od svih mikrostrukturnih sastojaka, ferit ima najmanju tvrdoću i čvrstoću te najveću plastičnost. Tvrdoća i čvrstoća perlita ovise o udjelima ferita i cementita te o obliku i veličini cementita. Zbog izdvajanja cementita i smanjenja udjela ugljika u feritnoj fazi za vrijeme bainitne pretvorbe, tvrdoća bainitne mikrostrukture manje ovise o udjelu ugljika nego kod martenzita. Na slici 20 prikazane su orijentacijske vrijednosti tvrdoće i granice razvlačenja mikrostrukturnih sastojaka nelegiranog čelika u ovisnosti o udjelu ugljika u čeliku.



Slika 20. Ovisnost tvrdoće i granice razvlačenja mikrostrukturnih sastojaka o udjelu ugljika u čeliku [2]

U slučaju izotermičkog raspada austenita na bainit i perlit, čak i kada se perlit i bainit stvaraju na istoj temperaturi, mikrotvrdoća bainita je manja od one perlita, što se može objasniti na način da perlit nastaje iz obogaćenog austenita zbog čega u strukturi sadrži puno veći udio cementita nego bainit [2].

Na mehanička svojstva bainita Najznačajniji utjecaj ima cementit [2] čiji se oblik, dimenzije te dispergiranost u feritnoj fazi mijenjaju s temperaturom pretvorbe. Donji bainit ima homogeniju mikrostrukturu te stoga povoljniji odnos mehaničkih svojstava od gornjeg bainita kod kojeg postoji veća mogućnost izdvajanja zasebne feritne ili cementitne faze.

Visoka tvrdoća i čvrstoća martenzita posljedica su očvršćivanja ferita intersticijskim atomima ugljika koji dovode do distorzije rešetke martenzita te do vrlo otežanog kretanja dislokacija. Kod čelika feritno-perlitne mikrostrukture, s povećanjem udjela ugljika u čeliku, odnosno s povećanjem udjela perlita, vrijednost granice razvlačenja i vlačne čvrstoće raste, dok se kontrakcija koja je mjera duktilnosti materijala smanjuje. Na temelju vrijednosti granice razvlačenja i vlačne čvrstoće za različite udjele ugljika može se zaključiti da perlit povećava intenzitet deformacijskog očvršćivanja [2].

Homogenom raspodjelom legirajućih elemenata, gustoćom dislokacija, precipitatima te sitnoznatošću mikrostrukture postiže se najbolji odnos između žilavosti i granice razvlačenja. Od svih navedenih mehanizama očvršćivanja, jedino se smanjenjem veličine kristalnog zrna povećavaju granica razvlačenja te omjer žilavosti i granice razvlačenja. Kod svih ostalih mehanizama očvršćivanja, s povećanjem granice razvlačenja dolazi do smanjenja omjera žilavosti i granice razvlačenja [2].

Najhomogeniju raspodjelu očvršćujućih elemenata te najveći omjer žilavosti i granice razvlačenja ima popušteni martenzit. Sljedeća najbolja mikrostruktura je popušteni bainit koji je nastao na niskim temperaturama. S obzirom na omjer žilavosti i granice razvlačenja, najgora je feritno perlitna mikrostruktura [2].

3.5. Način proizvodnje čelika povišene čvrstoće

Čistoća čelika i optimalni kemijski sastav su od velike važnosti za ispunjavanje zahtjeva koji se postavljaju na cjevovode. Što se tiče čistoće, postavljaju se zahtjevi za što manjim udjelom sumpora kako bi se osigurala veća lomna čvrstoća čelika i izbjegavanje uključaka aluminijevog oksida u blizini zavarenog spoja. Vrlo je bitno, pri proizvodnji voditi računa o što nižem udjelu nečistoća u čeliku.

3.5.1. Proces kontroliranog termomehaničkog valjanja čelika u obliku trake

Glavna linija proizvodnje traka čelika za cjevovode je postupak kontroliranog termomehaničkog valjanja koji je najučinkovitiji kada se primjenjuje na mikrolegirane čelike koji imaju povišenu temperaturu rekristalizacije. Međutim, postupak termomehaničkog valjanja podijeljen je u nekoliko koraka koji su zaslužni za konačna svojstva materijala.

3.5.2. Predgrijavanje

Temperatura predgrijavanja i prisutnost nerastvorenih čestica karbida od velike su važnosti cilj predgrijavanja je postizanje jednolike raspodjele topline po pločama lima i potpuno rastvaranje mikrolegiranih elemenata karbida i nitrida (Nb, V) (C, N). Tanke ploče griju se jednoliko u visokim pećima. Iznos temperature predgrijavanja ovisi o sastavu mikrolegiranih elemenata u čeliku. Za čelike povišene čvrstoće s udjelom niobija, temperaturni raspon temperature predgrijavanja iznosi od 1150 do 1250 °C. TiN čestice ostati će nerastvorenene na tim temperaturama [9].

3.5.3. Grubo termomehaničko valjanje

Cilj grubog termomehaničkog valjanja je postizanje najfinije moguće austenitne strukture prije postizanja temperature rekristalizacije. Iznad A3, odvija se rekristalizacija i očvršćivanje zrna. Faza grubog termomehaničkog valjanja završava iznad temperature ne-rekristalizacije, koja iznosi oko 1030 °C za čelike X60 i X80. Kako bi se spriječio rast rekristaliziranog austenitnog zrna upotrebljavaju se redukcijske metode koje se baziraju na TiN česticama. Za većinu čelika za cjevovode temperatura grubog termomehaničkog valjanja iznosi od 1200 do 950°C [9].

3.5.4. Završno termomehaničko valjanje

Svrha je završnog termomehaničkog valjanja je akumulacija naprezanja pri valjanju u zoni ne-rekristalizacije austenitnog zrna (ispod A_3) u svrhu dobivanja feritne strukture. Kontroliranim postupkom termomehaničkog valjanja može se dobiti vrlo fina (sitno-zrnata) feritna struktura. Postupak se odvija u zoni ne-rekristalizacije austenita (ispod temperature A_3) u nižem temperaturnom intervalu iznad Ar_3 temperature (npr. $T_{nr} > T > A_{c3}$). U toj zoni dolazi do precipitacije NbN uslijed smanjene topivosti Nb u austenitu. Austenitno zrno se izdužuje. Početna temperatura za postupak kontroliranog termomehaničkog valjanja iznosi od 1050 do 950 °C. Završna temperatura kreće se u intervalu od 730 do 1000 °C a uvelike ovisi o kemijskom sastavu, tj. Udjelu pojedinih mikro elemenata.

3.5.5. Snažna redukcija debljine lima

Snažna redukcija iznosa 60 do 85% ima za svrhu povećanje granice razvlačenja a istovremeno nema utjecaja na prijelaznu temperaturu krhko-žilavo, prema Charpy-u. Ova snažna redukcija rezultira daljnjim smanjenjem zrna.

3.5.6. Režim hlađenja

Režim hlađenja vrlo je bitan s aspekta postizanja optimalne čvrstoće uslijed kontroliranja učinka promjene mikrostrukture, usitnjavanja feritnog zrna i precipitacijskog očvršćivanja. Brzo hlađenje utječe na povećanje volumena bainita ili M/A strukture ili igličastog ferita [9].

3.5.7. Temperatura namatanja

Iako u ovoj fazi ne dolazi do promjene strukture materijala ona je vrlo bitna za precipitacijsko očvršćivanje, stoga je potrebno strogo kontrolirati iznos temperature da bi se postigla najveće precipitacijsko očvršćivanje. TiC, NbC i V(C, N) precipitiraju u feritu za vrijeme hlađenja. Temperatura bi trebala biti što niža za fino očvršćivanje karbida i nitrida u feritu, međutim ne smije biti ni preniska kako se ne bi smanjio udio TiC zbog prespore difuzije. Ukoliko je temperatura namatanja preniska, precipitacija je oslabljena što krajnje rezultira niskim iznosom čvrstoće materijala [9].

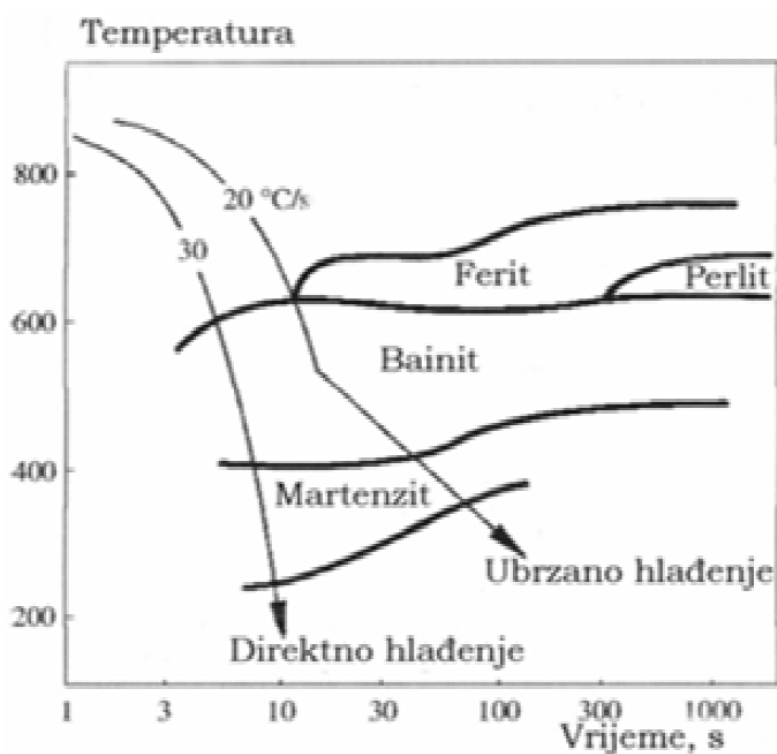
3.5.8. Oblikovanje cijevi i postupak zavarivanja

Cijevi se izrađuju hladnim oblikovanjem ili hladnom ekspanzijom. Cijevi je moguće zavarivati na dva načina, spiralno i longitudinalno. Zbog povećane kvalitete ploča lima koje služe za proizvodnju cijevi danas se više primjenjuje postupak longitudinalnog zavarivanja cijevi. Zadnji korak kod proizvodnje cijevi je odabir postupka i tehnologije zavarivanja. Zavarivanje cijevi vrlo je složeno i zahtijeva posebne analize kako bi se odabrao pravilan postupak, koji će zadovoljiti proizvodnost i troškove. Osim toga potrebno je pažljivo postaviti parametre zavarivanja kako ne bi prevelikim unosom topline narušili mikrostrukturu čelika. Na raspolaganju nam stoji nekoliko elektrolučnih postupaka zavarivanja, poput EPP-a, MAG-a, TIG-a. Osim elektrolučnih, u posljednje vrijeme koriste se i elektrootporni postupci zavarivanja.

Čelik X70 proizvodi se termomehaničkim valjanjem uz hlađenje na zraku. Kako bi se postigla čvrstoća koja je u skladu s normom kao mikrolegirni element, osim niobija, dodaje se i vanadij. Ubrzanim hlađenjem, nakon postupka termomehaničkog valjanja, dobije se fina struktura kod čelika koji sadrži određenu količinu bainita. Bainit postaje glavna strukturna komponenta u čelicima klase X70 pa nadalje do klase X100.

Čak i ako nema vanadija kao mikrolegiranog elementa, čelik s takvom strukturom zadovoljava zahtjeve na čvrstoću klase X70 čelika. Postoje dva načina na koji se može očuvati bainitnu mikrostrukturu: povećanjem količine legirnih elemenata ili brzine hlađenja. Prvi način nije ekonomski isplativ drugi način zahtijeva dodatnu opremu, ali je ekonomski isplativ i ne utječe na zavarljivost materijala. Uobičajena brzina hlađenja iznosi oko 15°C/s za debljinu radnog komada od 20mm.

Moguća je i kombinacija spomenutih metoda, ovisno o režimu hlađenja koji se može ostvariti postojećom opremom. Da bi se održala čvrstoća čelika X80, mikrostruktura mora imati 50% ferita i 50% bainita. Čelik klase X100 mora imati 100% bainitnu strukturu. Slika 21 prikazuje TTT dijagram za garantiranu bainitnu strukturu u čeliku X100, dobivenu uobičajenim postupkom hlađenja [9].



Slika 21. TTT diagram čelika X100
(kemijskog sastava 0.06%C; 1.80% Mn; 0.30%Mo; 0.20% Ni; 0.06%Nb) [9]

4. ZAVARIVANJE I ZAVARLJIVOST ČELIKA VISOKE ČVRSTOĆE

Usporedno s razvojem tehnike zavarivanja razvijala su se i istraživanja zavarljivosti. Cilj tih istraživanja je pronalaženje optimalnih parametara zavarivanja, koji će u okviru praktične primjene omogućiti dobivanje zavarenih spojeva potrebne kvalitete. Istraživanje zavarljivosti je kompleksan problem koji uz krajnju ozbiljnost pristupa, zahtjeva i visoku razinu znanja i praktičnog iskustva na području tehnike zavarivanja.

Utvrdjivanje zavarljivosti za klasične ili standardne vrste čelika nije toliko ni bitno, međutim, razvojem novih (specijalnih) čelika pristup problemu zavarljivosti složeno je i interdisciplinarno. Zavarljivost se općenito može smatrati kao skup faktora koji utječu na [2]:

- sposobnost zavarivanja,
- postizanje kvalitetnog zavarenog spoja,
- pouzdanu eksploataciju zavarenog proizvoda u zahtjevnom vijeku trajanja.

Postoji više definicija zavarljivosti, a najčešće se koristi definicija koju je dao Međunarodni institut za zavarivanje a usvojena je i od Međunarodne organizacije za standardizaciju (ISO) [2]: "Metalni materijal smatra se zavarljivim u određenom stupnju, utvrđenim postupkom zavarivanja i za određenu primjenu, ako se kontinuitet materijala ostvaruje zavarenim spojem izvedenim pod uvjetima predviđenim za ostvarivanje tog stupnja zavarljivosti. Zavareni spoj mora u potpunosti odgovarati prihvaćenim kriterijima kako svojim lokalnim karakteristikama, tako i utjecajem na konstrukciju koje je sastavni dio."

Ne postoji jedinstvena metoda ispitivanja koja bi sveobuhvatno odredila i kvantificirala ono što leži iza pojma zavarljivosti. Za ispitivanje i ocjenu zavarljivosti koristi se niz metoda od kojih svaka služi samo za određivanje nekih svojstava iz definicije zavarljivosti [2].

4.1. Ekvivalent ugljika

Zavarljivost osnovnog materijala često se procjenjuje na osnovu ekvivalenta ugljika. To je osobito važno kod čelika povišene čvrstoće, ali i kod ostalih čelika koji pokazuju sklonost prema zakaljivanju i hladnim pukotinama. Mikrostruktura zavarenog spoja dobije se djelovanjem ugljika i drugih kemijskih elemenata koji čine sastav čelika, uz određeni unos topline, brzinu hlađenja i druge čimbenike. Ugljik ima značajan utjecaj na strukturu i mehanička svojstva čelika. Budući da u velikoj mjeri povećava tvrdoću i čvrstoću čelika, ugljik ima odlučujući utjecaj na njegovu zavarljivost. Sa stajališta zavarivanja poželjno je imati što niži sadržaj ugljika u čeliku ($C \leq 0,20\%$) [2]. U ovisnosti o sadržaju ugljika u čeliku, koristi se odgovarajuća eksperimentalno dobivena formula navedena u sljedećoj tablici 1.

Tablica 1. Formule za izračunavanje ekvivalenta ugljika [2]

Metoda	Eksperimentalna formula	Korelacija sa pojavom pukotina
$C_{eq}(WES, JIS)$	$C_{ekv}(WES, JIS) = C + \frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Ni}{40} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{4} + \frac{V}{4}$	72,2 %
$CE(IIW)$	$C_{ekv}(IIW) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5}$	78,1 %
<i>Graville</i>	$C_{ekv}(Graville) = C + \frac{Mn}{16} + \frac{Ni}{50} + \frac{Cr}{23} + \frac{Mo}{7} + \frac{Nb}{8} + \frac{V}{9}$	82,6 %
<i>Tanaka</i>	$C_{ekv}(Pn - Tanaka) = C + \frac{Si}{20} + \frac{Mn}{10} + \frac{Cu}{20} + \frac{Cr}{30} + \frac{Mo}{20}$	82,8 %
<i>Düren</i>	$C_{ekv}(Dueren) = C + \frac{Si}{25} + \frac{Mn}{16} + \frac{Cu}{16} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{40} + \frac{V}{15}$	84,0 %
<i>Ito-Bessyo</i>	$C_{ekv}(P_{cm}) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5 \cdot B$	84,9 %
<i>Stout</i>	$C_{ekv}(Stout) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{40} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr}{10} + \frac{Mo}{10}$	86,6 %
<i>CEN</i>	$C_{ekv}(CEN) = C + A(C) \cdot \left(\frac{Si}{24} + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{20} + \frac{Cr + Mo + Nb + V}{5} + 5 \cdot B \right)$ $A(C) = 0,75 + 0,25 \cdot th[20 \cdot (C - 0,12)]$ $th x = \frac{e^x - e^{-x}}{e^x + e^{-x}} \quad - \quad \text{tangens hiperbolni}$	91,1 %

4.2. Greške u zavarenim spojevima

Ukoliko je unos topline premali dobije se povećana čvrstoća i tvrdoća, što uz krutost konstrukcije i prisutnost vodika u zavarenom spoju može uzrokovati nastajanje pukotina, također smanjuje se deformabilnost i povećava sklonost krhkom lomu. Preveliki unos topline može uzrokovati tople pukotine različitog karaktera, te osjetljivost na početak i širenje krhkog loma duž zone staljivanja pri niskim temperaturama [14].

Pokazalo se da se kada se radi o površinskim pukotinama i pukotinama kroz cijelu debljinu lima, najbolje otkrivaju metodom penetrantske kontrole i magnetskom metodom (uz obaveznu vizualnu kontrolu prije svih kontrola, pomoću odgovarajućih povećala i osvjjetljenja). Pukotine u unutrašnjosti lima moguće je otkriti ultrazvučnom metodom. U praksi se najčešće susreću hladne pukotine, ali s jednakom ozbiljnošću treba shvatiti i ostale pukotine, jer svaka pukotina u uvjetima koji pogoduju širenju pukotine može dovesti do otkaza zavarenog spoja ili proizvoda u eksploataciji. Hladne pukotine nastaju pri hlađenju zavarenog spoja na temperaturi ispod 200 °C, a moguće je da nastanu i nekoliko dana nakon zavarivanja, pa su tako u tom slučaju dobile naziv "zakašnjele" hladne pukotine. Kontrolu kvalitete metodama bez razaranja na zavarenim konstrukcijama potrebno je provoditi barem 48 sati nakon zavarivanja to se naime smatra inkubacijskim periodom nastajanja zakašnjelih hladnih pukotina, kod čelika koji pokazuju sklonost prema nastajanju hladnih pukotina. Hladne pukotine mogu nastati u zoni taljenja i u zoni utjecaja topline, a mogu biti orijentirane u smjeru uzdužne osi zavarenog spoja, okomito ili pod nekim kutom u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja.

- Tri su osnovna uzroka nastajanja hladnih pukotina, a to su [12]:
sklonost materijala prema zakaljivanju (ocjenjuje se preko različitih eksperimentalno dobivenih formula za ekvivalent ugljika),
- postojanje zaostalih napetosti (mogu se mjeriti jednom od tenzometrijskih metoda ili procjenjivati s obzirom na debljinu materijala, oblik i položaj zavarenog spoja na konstrukciji, gustoći toplinskog toka i količini unesene energije) i
- količina difuzijskog vodika (može se eksperimentalno odrediti, npr. glicerinskom metodom).

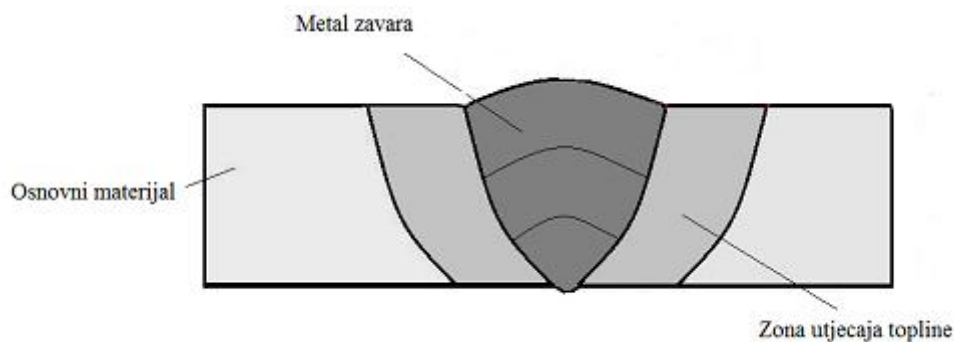
Za nastajanje hladnih pukotina nužna su sva tri navedena uzročnika. Vjerojatnost nastajanja je tim veća što je veći njihov utjecaj. Hladne pukotine mogu nastati u metalu zavora (zoni taljenja) i/ili zoni utjecaja topline.

Mogu biti paralelne ili pod nekim kutom u odnosu na uzdužnu os zavarenog spoja, pa s obzirom na smjer rasprostiranja mogu biti longitudinalne (L) i transverzalne (T) pukotine. Prijelomna površina je svijetla, za razliku od toplih pukotina gdje dolazi do površinske oksidacije toplih pukotina koje nastaju na povišenim temperaturama [14]. Tople pukotine nastaju pri kristalizaciji i hlađenju zavarenog spoja na relativno visokim temperaturama npr. kod čelika od temperature kristalizacije do približno 900 °C. To je temperatura skrućivanja eventualno prisutnih nečistoća u zavarenom spoju, a koje su u uvjetima naprezanja zbog hlađenja zavarenog spoja osnovni uzročnik nastajanja toplih pukotina. Ove pukotine mogu nastati u zoni utjecaja topline, ali isto tako i u zoni taljenja zavarenog spoja. Postoje dva osnovna tipa toplih pukotina [2]:

- kristalizacijske tople pukotine – nastaju u zoni taljenja
- podsolidusne ili likvacijske tople pukotine – nastaju u zoni utjecaja topline.

4.3. Metalurgija zavarivanja

Pod pojmom metalurgija zavarivanja podrazumijevaju se pojave vezane s procesnom (dobivanje metala, rafinacija, legiranje, lijevanje, itd.) i fizikalnom metalurgijom (kristalografija, mehanička ispitivanja, metalografija, itd.). Zavareni spoj sastoji se od zone taljenja (ZT), zone utjecaja topline (ZUT) koja se još naziva i prijelazna zona. Zavareni spoj prikazan je na slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz zavarenog spoja

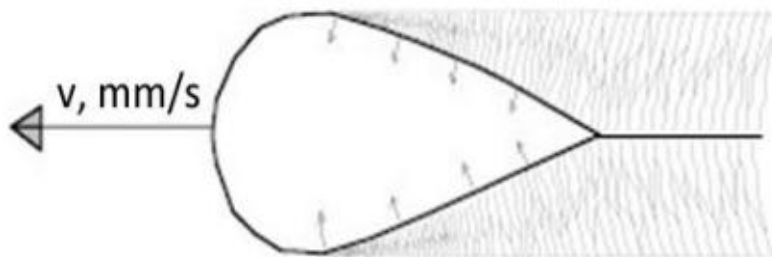
Posebnost tehnologije zavarivanja u odnosu na ostale predstavljaju vremenski brze promjene temperature (i preko 1000 °C/s), te lokalno unošenje topline nekim izvorom topline. Lokalne temperature se kreću od temperature iznad tališta i vrelišta metala, pa sve do temperature okoline, a ponekad i ispod 0 °C, za slučajeve posebnih obrada kaljenjem. Takvi uvjeti uzrokuju lokalna istezanja i stezanja a ona su uzrokom deformacija i napetosti. Još i uzrokuju kemijske reakcije između rastaljenog metala i okoline (troske, atmosfere), različitu rastvorljivost među elementima i fazama, te difuzijske procese. Sve navedeno za posljedicu daje neujednačenu mikrostrukturu presjeka zavarenog spoja uz prisustvo trajnih deformacija i zaostalih napetosti [12].

Zavarivanje bitno utječe na promjene kemijskog sastava zone taljenja, kao i strukture zone taljenja i zone utjecaja topline. Pri zavarivanju dolazi do pogoršanja mehaničkih, korozijskih i ostalih svojstava zavarenog spoja.

4.3.1. Metalurgija zone taljenja (ZT)

U kapljicama rastaljenog metala i kupki zavara dolazi do sličnih pojava kao pri proizvodnji, taljenju metala u pećima. Dolazi do međusobnog djelovanja rastaljenog metala, troske i okolišne atmosfere. Djelovanjem izvora topline dolazi do izgaranja pojedinih elemenata (C, Mn, Si, Cr, Ni, Ti) i drugih ili je pak moguće iz troske (obloga elektrode, prah) dolegirati rastaljeni metal raznim elementima. Zbog utjecaja atmosfere oko rastaljenog metala i sastava rastaljenog metala dolazi u većoj ili manjoj mjeri do stvaranja oksida, nitrida, karbida, karbonitrida, sulfida, eutektika, intermetalnih spojeva i drugih faza [12].

Kasnije dolazi do kristalizacije i skrućivanja kupke taj dio spoja naziva se zona taljenja (ZT). Ovisno o vrsti metala, daljim hlađenjem u ZT, može doći do strukturnih promjena, izlučivanja različitih faza te grešaka (pore, pukotine). Pojava klica i rast kristala ovisit će o pothlađivanju rastaljenog metala. Obično kristali rastu okomito na rubove spoja, a sukobljavaju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati vruće pukotine ili biti slabo mjesto pri opterećenju. Kristalizacija i tipični proces skrućivanja kupke prikazan je na slici 23.



Slika 23. Proces kristalizacije – skrućivanje kupke i rast kristala [15]

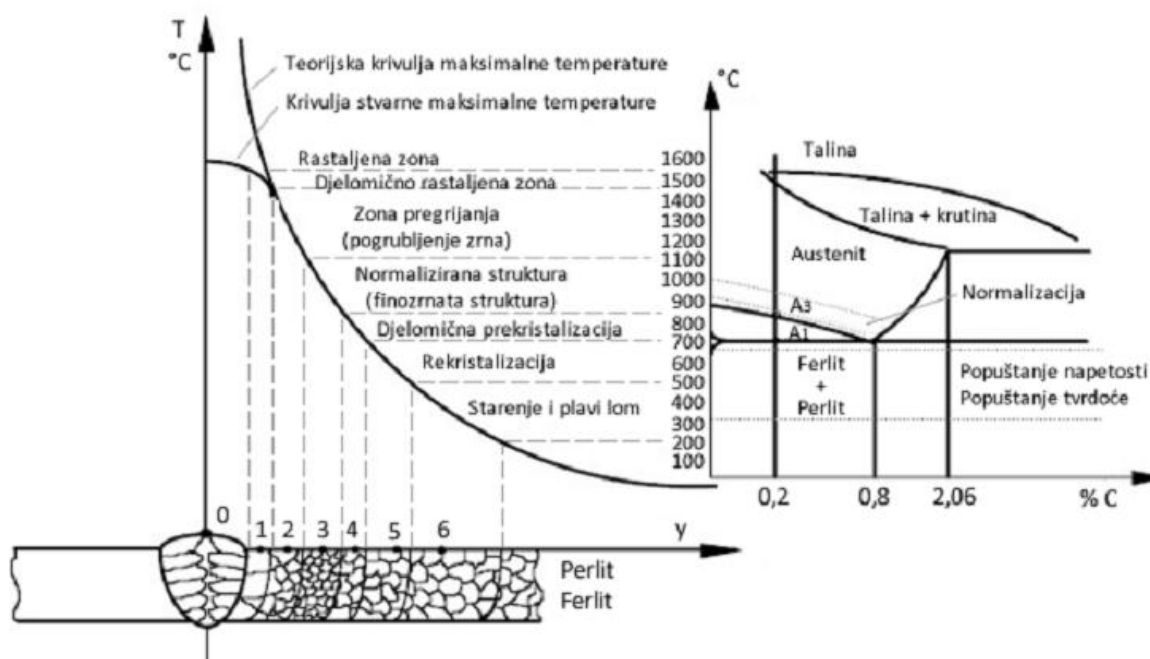
Konačni kemijski sastav i kristalna struktura ZT moraju se naći u određenim granicama, da bismo postigli određena mehanička, antikorozijska i eventualno neka druga svojstva.

Pojave u zoni taljenja (ZT) [12]:

- izgaranje i dolegiranje elemenata,
- pojava nepoželjnih spojeva,
- rafiniranje i dezoksidacija kupke,
- miješanje osnovnog materijala (OM) i dodatnog materijala (DM),
- smjer orijentiranosti kristala ovisno o smjeru odvođenja topline,
- broj prolaza, koji utječe na miješanje OM i DM i "odžarivanje",
- zaostale napetosti i trajne deformacije,
- moguće nehomogenosti, greške ZT (pukotine, poroznosti, troska),
- brzo ili sporo hlađenje koje može štetno utjecati zbog zakaljivanja pri brzom ili zbog porasta zrna i izlučivanja raznih nepoželjnih faza pri sporom hlađenju.

4.3.2. Metalurgija zone utjecaja topline (ZUT)

ZUT teorijski obuhvaća područje osnovnog materijala (OM), u kojem se OM nije talio za vrijeme zavarivanja, ali u kojem je zbog unosa topline zavarivanjem došlo do promjene mikrostrukture, mehaničkih, korozijskih ili drugih svojstava. Izrazite promjene strukture u ZUT-u kod dovoljno sporog hlađenja za nelegirani čelik su iznad A_1 ($723\text{ }^{\circ}\text{C}$). Ova zona će dati drugačiji refleks svjetlosti u odnosu na osnovni materijal, jer je u toj zoni došlo do promjene veličine zrna, usmjerenja zrna i strukture. Za poboljšane čelike, koji se kale i popuštaju pri relativno niskim temperaturama, npr. na $300\text{ }^{\circ}\text{C}$, bilo kakvo grijanje iznad $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ će uzrokovati bitne promjene svojstava OM (dobit će se niža čvrstoća), pa će ZUT obuhvatiti zonu zagrijavanja na temperaturama od 300 do $1500\text{ }^{\circ}\text{C}$. Širina ZUT ovisna je o unosu topline i iznosi najčešće 2 do 8 mm [2].



Slika 24. ZUT zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog feritno – perlitnog čelika s 0.2% C [18]

Na slici 24 prikazana je zona utjecaja topline zavarenog spoja nelegiranog niskougljičnog čelika s feritno – perlitnom strukturom i sadržajem ugljika od 0.2%.

Zona taljenja (na slici 24 označena sa 0) obuhvaća točke zavarenog spoja, koje su bile iznad likvidus linije, tj. koje su pri zavarivanju bile potpuno rastaljene. Za vrijeme ohlađivanja dolazi do kristalizacije, koja će dati strukturu različitu od strukture OM. Rast kristala i pojava klica ovisit će o pothlađivanju rastaljenog metala. Kristali obično rastu okomito na rubove spoja, a sukobljavaju se u sredini, stvarajući zonu segregacija nečistoća s nižim talištem, koja može uzrokovati vruće pukotine ili biti slabo mjesto pri opterećenju [2].

Djelomično rastaljena zona (na slici 24 označena sa 1) (između linija solidusa i likvidusa) predstavlja dvofazno područje (talina + krutina) koje je bogato je legirnim elementima i nečistoćama (imaju nižu točku taljenja), a sadrži i plinove. Lokalno povišen sadržaj nečistoća kod brzog hlađenja nakon zavarivanja ne može se difuzijom izjednačiti sa okolinom, pa ostaje mreža otvrdnutih segregiranih nečistoća. Pri ovako visokim temperaturama dolazi i do taljenja ostalih nemetalnih faza (sulfidi, fosfidi, oksidi), čime metalna veza slabi i omogućuje pojavu vrućih pukotina [2].

Zona pregrijanja (na slici 24 označena sa 2) se nalazi ispod solidus točke i dosta iznad A3 (1100-1450 °C). Dolazi do porasta odnosno pogrubljenja zrna austenita, koja pri brzom hlađenju prelaze u Widmannstaettenovu strukturu, koja je nešto tvrđa i krhkija nego što je poželjno. U slučaju da se pojavi Widmannstaettenova struktura u čeliku, tada možemo ponovo postići fino zrno i žilavu feritno perlitnu strukturu normalizacijom, tj. zagrijavanjem nešto iznad A3 i relativno sporim hlađenjem [2].

Zona normalizacije (na slici 24 označena sa 3) se nalazi nešto iznad A3. Struktura je finožrnata, normalizirana i obično posjeduje bolja svojstva od osnovnog materijala. Ovdje je zagrijavanjem došlo do pune transformacije ferita i perlita u austenit, a za hlađenja dolazi ponovno do transformacije u perlit i ferit stvaranjem klica i njihovim rastom u vrlo finu feritno-perlitnu strukturu [2].

Zona starenja i plavog loma (na slici 24 označena sa 6). Nalazi se u temperaturnom intervalu od 200 do 500 °C. Ne dolazi do strukturnih promjena ni oblika zrna, ali uslijed starenja može doći do krhkosti. Ostaje feritno-perlitna mikrostruktura. Ako je čelik zakaljiv, tada u ovoj zoni kao i u ostalim zonama koje su zagrijane iznad A3 može doći do zakaljivanja, a u konačnici i do 100% strukture martenzita, što ovisi o brzini hlađenja i sastavu čelika. Izbjegavanje zakaljivanja se može postići podgrijavanjem ili unošenjem veće količine topline zavarivanjem. Kod višeslojnog zavarivanja svaki naredni sloj odžari-normalizira, bar djelomično sloj ispod, što povoljno djeluje na nosivost spoja. Zavari u jednom prolazu imaju relativno grubu kristalnu strukturu [2].

Zona djelomične prekrystalizacije (na slici 24 označena sa 4) se nalazi u temperaturnom području između A_i i A₃ točke, za vrijeme hlađenja, dolazi do nastajanja klica ferita, na granicama ili unutar zrna austenita, koje zatim rastu, a kad temperatura padne ispod točke A₁, zaostali se austenit pretvara u perlit. Naravno, u ovisnosti o vrsti čelika i brzini hlađenja, moguća je i pretvorba zaostalog austenita u martenzit koji je tvrd i krhak te je stoga nepoželjan [2].

Zona rekristalizacije (na slici 24 označena sa 5) se nalazi na temperaturama nižim od A₁ temperature do 500 °C, gdje zaostali austenit prelazi u perlit [2].

4.3.3. Mikrofaze zavarenog spoja

Ustanovljeno je da u metalu zavara mikrolegiranih čelika dominira struktura ferita, koja se pojavljuje u različitim morfološkim oblicima. Ohlađivanjem mjesta zavara na temperaturu okoline nastaje mikrostruktura čiji su glavni konstituenti, odnosno morfološki oblici:

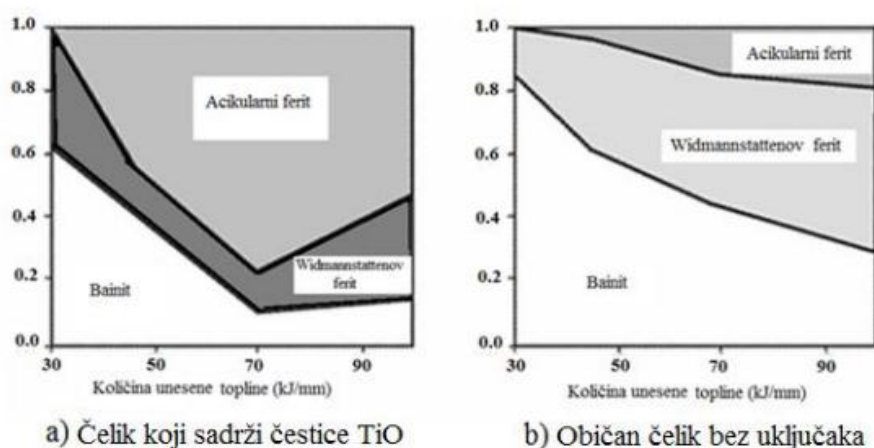
- α - ferit (pločasti ferit ili eng. allotriomorphic ferrite),
- α_w - ferit (Widmannstättenov ferit)
- α_a - ferit (igličasti ili acikularni ferit, eng. acicular ferrite).

Također, moguće je prisustvo martenzita, zaostalog austenita ili pak novonastalog perlita. Nastanak Widmannstättenove strukture ovisi o kemijskom sastavu metala, veličini austenitnih zrna te brzini hlađenja. Nastajanje Widmannstättenove strukture moguće je u metalu zavara, zoni taljenja i u pregrijanom osnovnom materijalu a uslijed izražene krupnozrnatosti izaziva povećanje krhkosti materijala. Legirajući elementi kao što su mangan, krom i molibden olakšavaju stvaranje Widmannstättenove strukture u čeliku [2].

Acikularni ili igličasti ferit se često koristi kao sinonim za pločice bainitnog ferita. Transformacija acikularnog ferita predstavlja fenomen nepotpune rekacije, što je ujedno i karakteristika bainita, stoga je ove dvije strukture ponekad teško razlikovati. Danas je u metalurgiji zavarivanja prihvaćeno da se morfologija za koju su karakteristične ukrštene iglice, odnosno pločice koje se prostiru u više pravaca i po pravilu su unutar zrna ujezgrene na uključcima, nazivaju acikularni (igličasti) ferit [2]. Kemijski sastav aktivnih uključaka na kojima se jezgri igličasti ferit nije točno određen, pa tako sve vrste uključaka kao što su, npr. TiO₂, Al₂O₃, SiO₂, MnO-SiO₂, TiO, mogu ujezgriti igličasti ferit u početnim fazama transformacije.

U zavarenom spoju koji ima više prolaza, svaki slijedeći prolaz vrši toplinski utjecaj na prethodni sloj tj. vrši se toplinska obrada prethodnog sloja što dovodi do stvaranja sitnozrnate strukture prethodnog sloja.

Pri zavarivanju čelika austenitna zrna u zoni utjecaja topline rastu, a stupanj okrupnjenja zrna zavisi o količini unesene topline tijekom samog procesa. Iz ovoga proizlazi da kada se zavaruju čelici koji sadrže odgovarajuće uključke, količina igličastog ferita koji se formira u ZUT-u raste na temelju bainita sa porastom količine unesene topline (pri čemu raste i veličina austenitnog zrna) što pokazuje slika 25 a [2]. Pri vrlo velikim količinama unesene topline stupanj hlađenja toliko opada da se javljaju veće količine Widmannstattenovog ferita pri čemu dolazi do odgovarajućeg smanjenja količine igličastog ferita. U čeliku koji ne sadrži odgovarajuće uključke sadržaj igličastog ferita je uvijek mali slika 25 b. Slika 25 prikazuje promjenu mikrostrukture dvaju čelika u ovisnosti o unesenoj toplini.



Slika 25. Promjena mikrostrukture čelika u ZUT-u u ovisnosti o unesenoj toplini [2]

4.4. Zavarljivost čelika visoke čvrstoće

Kad je u pitanju problem zavarljivosti čelika visoke čvrstoće možemo pristupiti sa metalurškog, konstrukcijskog i izvedbenog stajališta. Kako je već napomenuto ranije u tekstu metalurška zavarljivost čelika često se izražava ekvivalentom ugljika. Osim izračunavanja ekvivalenta ugljika kod mikrolegiranih čelika visoke čvrstoće potrebna su dodatna ispitivanjima kako bi donijeti ocjenu o njihovoj zavarljivosti. Naime uz jednaki ekvivalent ugljika kod različitih debljina i različitih sadržaja vodika u zavaru nalazimo različitu osjetljivost prema hladnim pukotinama. Zato je kod mikrolegiranih čelika potrebno ispitati, između ostalih, i slijedeće čimbenike: sklonost nastajanju toplih pukotina, sklonost nastajanju hladnih pukotina, osjetljivost zavora i zone utjecaja topline prema krhkom lomu.

Za ocjenu zavarljivosti čelika povišene čvrstoće provode se brojna ispitivanja, kao što su:

- Nastajanje hladnih pukotina,
- Nastajanje toplih pukotina,
- Lamelarno trganje,
- Krhki lom,
- Povišenje tvrdoće materijala,
- Starenje materijala.

Prilikom zavarivanja čelika visoke čvrstoće na prvom mjestu javlja se problem pojave pukotina. Pukotine se mogu podijeliti na one u [14]:

- Metalu zavora,
- Osnovnom materijalu (mogu nastati i u zoni utjecaja topline).

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u metalu zavora:

- Prevelika brzina hlađenja zavarenog spoja,
- Strukturne transformacije u zavarenom spoju (nastajanje krhkih struktura).

Najznačajniji metalurški uzroci nastajanja pukotina u osnovnom materijalu su:

- Kemijski sastav materijala,
- Prisutnost vodika,
- Nastajanje unutrašnjih naprezanja zbog temperaturnog ciklusa pri zavarivanju.

5. MAG POSTUPAK ZAVARIVANJA

MAG zavarivanje je elektrolučni postupak zavarivanja taljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi aktivnog plina. Električni luk se održava između taljive elektrode u obliku žice koja se kontinuirano dobavlja i radnog komada.

Uređaj za MIG/MAG zavarivanje koristimo prilikom MAG kao i prilikom MIG postupka zavarivanja. Pogonski sistem dodaje žicu konstantnom brzinom kroz cijevni paket i pištolj u električni luk. Žica je istovremeno i elektroda i dodatni materijal. Zaštitni plinovi koji se koriste kod ovih postupaka štite rastaljeni materijal od štetnog utjecaja okoline [16].

Kod MAG zavarivanja najčešće se koriste pune žice čiji su promjeri od 0,6mm do 2,4mm. Žice od čeličnih materijala su pobakrene ili poniklane radi boljeg električnog kontakta te zaštite od korozije. Žice mora biti glatka dimenzijski vrlo točna te mora biti pravilno namotana na kolut kako bi se osigurala konstantna dobava žice.

Parametri kod MAG zavarivanja su sljedeći [16]:

- jakost struje I (A) – razmjerna s brzinom dobave žice v_z -m/min,
- napon električnog luka U (V) – razmjeran s visinom električnog luka,
- brzina zavarivanja v_z (mm/min),
- slobodni kraj žice l_{skz} (mm),
- protok plina Q (l/min) i vrsta plina,
- induktivitet L (H),
- promjer žice d_z (mm),
- nagib pištolja α (°).

Prednosti MAG zavarivanja u odnosu na ostale elektrolučne postupke su [16]:

- primjenjiv za zavarivanje svih vrsta materijala,
- velika mogućnost izbora parametara i načina prijenosa materijala,
- zavarivanje u svim položajima,
- zavarivanje u radionici i na terenu,
- mogućnost primjene različitih plinskih mješavina,
- mogućnost primjene praškom punjene žice,
- široki raspon debljina osnovnog materijala,
- visoka učinkovitost i proizvodnost,
- pogodan za automatizaciju.

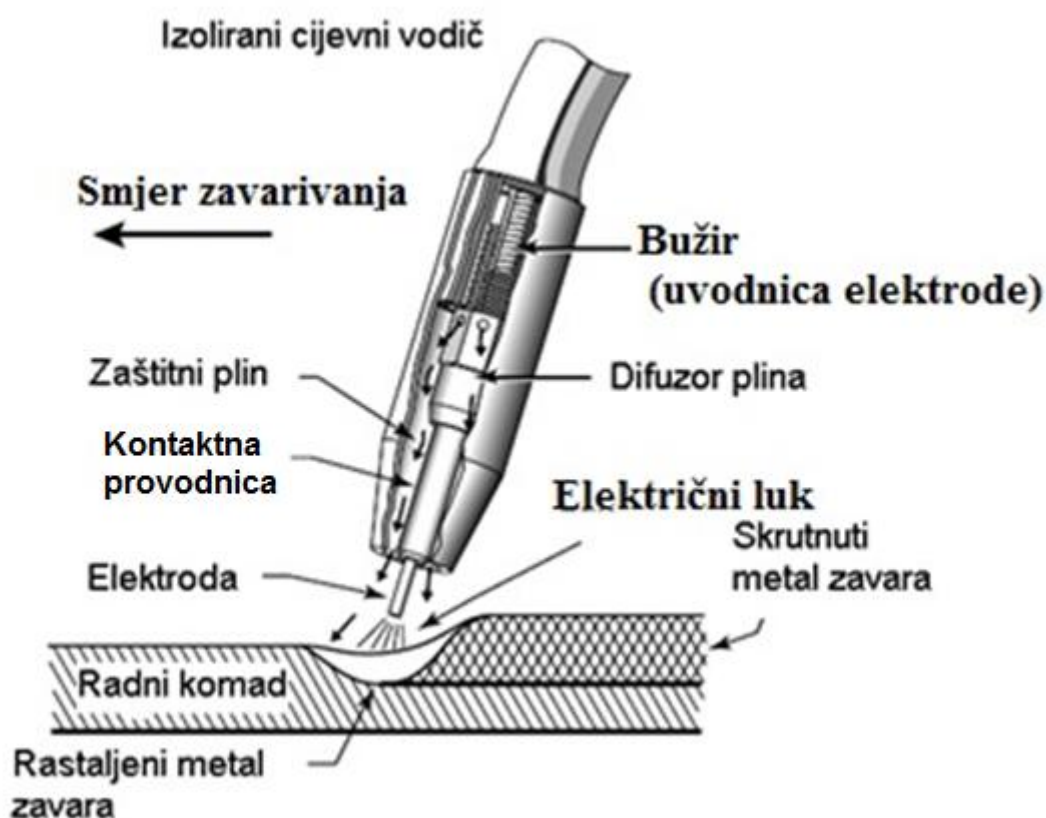
Nedostaci MAG zavarivanja [16]:

- kod rada na terenu moguće greške (vjetar može otpuhivati zaštitini plin),
- problemi kod dovođenja žice (pogotovo ako je duljina polikabela veća od 3m),
- veći broj grešaka uslijed neodgovarajuće tehnike rada i parametara zavarivanja (naljepljivanje, poroznost),
- štrcanje kod zavarivanja kratkim spojevima (gubici i potrebna naknadna obrada zavarenog spoja),
- složeniji uređaji (automatsko dovođenje žice, regulacija visine električnog luka, mikroprocesorsko upravljanje).

5.1. Osnove MAG postupka

MIG predstavlja kraticu za Metal Active Gas a MIG za Metal Inert Gas. MIG i MAG postupci su zavarivanja kod kojih do taljenja metala dolazi djelovanjem topline električnog luka uspostavljenog između konstantno dobavljane elektrode kao dodatnog materijala i radnog komada. Procesi se ostvaruju u zaštitnoj atmosferi aktivnih ili inertnih plinova odnosno plinskih mješavina koje konstantno struje kroz sapnicu. U okviru MAG zavarivanja razlikuju se MAGC (Metal Active Gas Carbon) i MAGM (Metal Active Gas Mixture) postupci. Kod MAGC kao zaštitni plin koristi se čisti CO_2 , a kod MAGM to su plinske mješavine sa značajnim udjelom aktivnog plina.

Na slici 26 prikazana je skica procesa zavarivanja s presjekom pištolja.

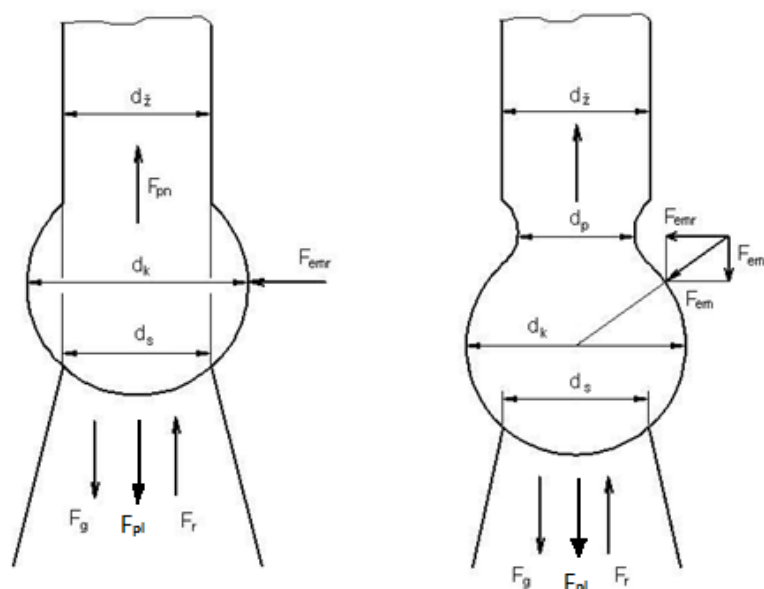


Slika 26. Presjek pištolja u radu kod MIG/MAG postupka zavarivanja [14]

Na prijenos metala kod MAG postupka zavarivanja djeluju sljedeće sile [9]:

- sila gravitacije – F_g ,
- elektromagnetska sila – F_{em} ,
- sila površinske napetosti – F_{pn} ,
- sila strujanja i pritiska plazme luka – F_{pl} ,
- sila eksplozije u kapljicama metala – F_e ,
- sila reaktivnog djelovanja – F_r .

Na slici 27 Nalazi se shematski prikaz sila na kapljicu metala u električnom luku.



Slika 27. Shematski prikaz djelovanja sila na kapljicu metala u električnom luku [14]

Neke od gornjih sila prikazanih slikom 2. djeluju na način da pomažu prijenosu metala dok se neke opiru prijelazu kapljice u kupku taline, prema izrazu (1) :

$$F = F_g + F_{pn} + F_{em} + F_r + F_{pl} + F_e \quad (.1)$$

Od navedenih sila koje djeluju u električnom luku najveći utjecaj ima elektromagnetska sila. Omjerom radijalne i aksijalne komponente elektromagnetske sile stvaraju se uvjeti za tzv. „Pinch“ efekt koji doprinosi odvajanju kapljice rastaljenog metala u zavarivačku kupku.

5.2. Metode prijenosa metala

Metode prijenosa metala ovise o jakosti struje, naponu električnog luka, vrsti dodatnog materijala i promjeru žice, vrsti zaštitnog plina ili plinske mješavine, a dijelimo ih na [16]:

- prijenos kratkim spojevima,
- prijenos mješovitim lukom,
- prijenos štrcajućim lukom.

5.2.1. Prijenos metala kratkim spojevima

Ovim načinom prijenosa metala do taljenja žice dolazi pomoću električnih kratkih spojeva koji se periodički ponavljaju. Glavne su značajke mali unos topline i činjenica da se sav prijenos dodatnog metala vrši pri fizikalnom kontaktu elektrode i osnovnog materijala odnosno taline. Period pri kojem se odvaja jedna kapljica metala dijeli se na fazu kratkog spoja i fazu električnog luka. Do odvajanja kapljice doći će u ovoj prvoj fazi za koju je karakteristično da se vrh elektrode nalazi u fizikalnom kontaktu sa rastaljenim metalom pri čemu raste jakost struje što dovodi do povećanja magnetske sile. Sile koja se javlja na koncu elektrode i koja zbog djelovanja elektromagnetskog polja steže kapljicu taline oko vrška žice (slika 28.). Ova pojava je još poznata i kao „pinch effect“. Kapljica metala kod kratkih spojeva većeg je promjera od žice kojom se zavaruje. Na slici 28 prikazan je prijenos dodatnog metala kratkim spojevima

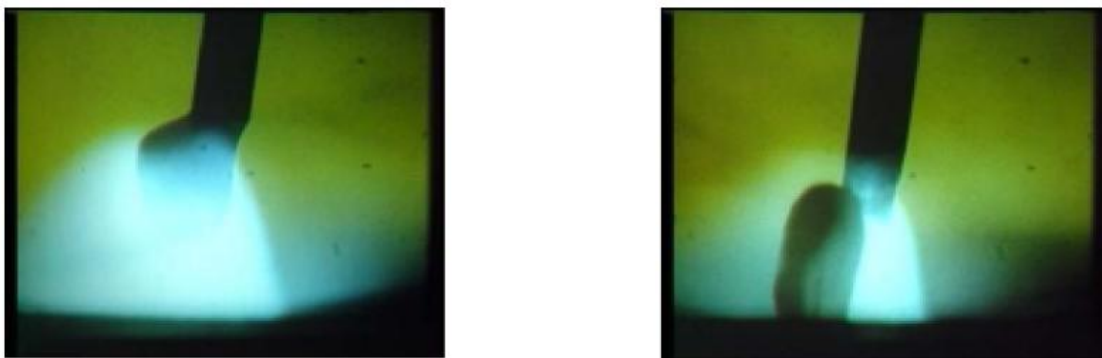


Slika 28. Prijenos dodatnog metala kratkim spojevima [14]

Ovaj prijenos metala u luku daje talinu malog volumena koja se brzo hladi pa je pogodan za zavarivanje tankih limova i korijena zavara kod debljih komada, a najčešće se vrši u zaštiti ugljičnog dioksida i njegovih mješavina [14].

5.2.2. Prijenos metala mješovitim lukom

Mješoviti luk se javlja u području jakosti struja i napona između vrijednosti prijenosa kratkim spojevima i štrcajućim lukom. Kada se prijenos metala ostvaruje mješovitim lukom odvija se prvo na vrhu žice stvori krupna kapljica metala koja se potom pod djelovanjem sila u električnom luku odvaja te pada u talinu bez kratkog spoja. Ovisno o duljini električnog luka, gustoći i jakosti struje te naponu luka, pojedine kapljice mogu toliko narasti da u određenom trenutku dodirnu talinu te tada nastupa kratki spoj. Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom prikazan je na slici 29.

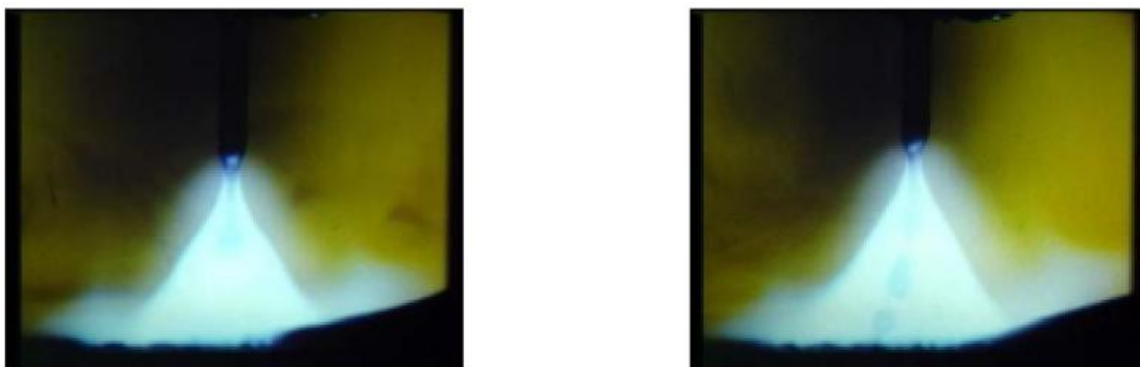


Slika 29. Prijenos dodatnog metala mješovitim lukom [14]

Promjer kapljice metala veći je od promjera žice kojom se zavaruje. Proces zavarivanja s prijenosom metala mješovitim lukom teško se kontrolira, javlja se intenzivno prskanje, slabije je kvašenje taline, što uzrokuje nepotpuno spajanje materijala, a površina zavora je izbrazdana i nepravilna. Ovaj prijenos metala posebno je izražajan kod zavarivanja u zaštiti čistog ugljičnog dioksida ili mješavina s njegovim snažnim utjecajem.

2.2.3. Prijenos metala štrcajućim lukom

Kod prijenosa metala štrcajućim lukom, kontinuirano dovođena žica elektrode se rastaljuje u području većeg napona i veće jakosti struje zavarivanja pri čemu se stvara mlaz malih kapi taline koje aksijalno putuju kroz električni luk te velikim brzinama uranjaju u rastaljeni osnovni materijal [16]. Niti u jednom trenutku u vremenu održavanja električnog luka elektroda ne dolazi u dodir s osnovnim materijalom (slika 30).



Slika 30. Prijenos metala štrcajućim lukom [14]

Promjer kapljice je manji od promjera žice kojom se zavaruje. Ono što je svojstveno za ovaj prijenos je veliki unos topline i velika količina nataljenog materijala. Primjenu nalazimo kod zavarivanja debljih dijelova u vodoravnom položaju. Nije pogodan za zavarivanje u prisilnim položajima. Zaštitne plinske mješavine koje posebno podržavaju ovaj način prijenosa jesu one s većinskim udjelom argona.

5.3. Modificirani MAG postupci zavarivanja: STT Postupak zavarivanja

STT postupak zavarivanja je unaprijeđeni MAG postupak zavarivanja. Udruženjem invertorske tehnologije visoke frekvencije te naprednih sustava upravljanja struje i napona omogućeno je kvalitetno zavarivanje u uvjetima koji otežavaju rad klasičnom MAG postupku zavarivanja. Ti se odnosi prvenstveno na zavarivanje korijena zavara kod zavarivanja cijevi, ali i zavarivanje tankih limova gdje se zahtijeva smanjeni unos topline u zoni zavara.

Prednost STT postupka očituje se u jednostavnosti upotrebe. Zavarivači koji se koriste MAG postupkom zavarivanja u kratkom vremenskom periodu mogu savladati i STT postupak. Postupak je pogodan za zavarivanje različitih metala, od konstrukcijskog čelika do duplex nehrđajućih čelika.

Preciznim upravljanjem strujom na STT uređaju značajno smanjujemo količinu plinova nastalih pri zavarivanju također smanjujemo prskanje te naknadno vrijeme potrebno za brušenja zavara. Time povećavamo produktivnost te smanjujemo troškove zavarivanja. STT uređaj ima mogućnost nezavisnog upravljanja brzinom žice od jačine struje, a prikaz struje i napona zavarivanja omogućen je digitalnim voltmetrom i ampermetrom. Pogonski sustav žice u skladu je sa cijelim uređajem pa je tako za pogon žice zadužen sustav sa četiri valjka čime se osigurava kontinuirana dobava žice bez zastoja [12].

Prijenos površinskom napetošću (Surface Tension Transfer) predstavlja kontrolirani prijenos materijala kratkim spojevima koji prilagođuje oblik vala struje i napona fizici zavarivačkog luka i prijenosa metala u istom. Postupak smanjuje prskanje tako što „odreže“ vršnu vrijednost struje u trenutku prije nego što se tekući „most“ između žice i radnog komada odlomio u električni luk. „Most“ se lomi površinskom napetošću i teče mehaničkom inercijom pri niskim strujama.

Primjenom tehnologije upravljanja oblikom strujnog vala (eng. Wavform Control Technology) STT omogućuje promjenu veličine struje u žici unutar mikrosekundi, čime se značajno smanjuje ili čak i uklanja osnovna mana zavarivanja MAG postupkom kod prijenosa metala kratkim spojevima, a to je eksponencijalni uspon struje i nekontrolirano prskanje rastaljenog materijala [12].

5.3.1. Karakteristike STT postupka zavarivanja

STT izvor struje nema niti ravnu (CV) padajuću (CC) ni karakteristiku. Na osnovu trenutnih zahtjeva električnog luka, uređaj osigurava izlazne parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica se prenosi u žlijeb za zavarivanje pomoću sile površinske napetosti između kapljice i kupke. STT uređaj kontinuirano prati jakost struje u električnom luku te regulira istu, a optimalne karakteristike luka održavaju se i kod značajnijih promjena duljine slobodnog kraja žice. Uređaj je u sposobnosti regulirati struju zavarivanja u mikrosekundama, što je posljedica mikroprocesorskog upravljanja. Konstruiran je za poluautomatsku primjenu gdje se brzina zavarivanja i duljina slobodnog kraja žice konstantno mijenjaju pa zbog toga mikroprocesorska regulacija dolazi do posebnog izražaja. Moguća je uporaba različitih zaštitnih plinova te njihovih mješavina (CO_2 ; $\text{Ar}82\%-\text{CO}_218\%$; $\text{Ar}98\%-\text{CO}_22\%\dots$), ovisno o vrsti osnovnog materijala koji se zavaruje [12].

Takav način rada uređaja olakšava posao zavarivaču zbog toga što dolazi do manje količine plinova koji nastaju pri zavarivanju, manja je emisija zračenja zbog manjeg unosa topline i nižih parametara zavarivanja, a smanjeno je i prskanje pa je potreba za naknadnim brušenjem zavarenog spoja uvelike smanjena. Zbog konstantne regulacije električnog luka zavarivaču je olakšan rad te je smanjen utjecaj promjene slobodnog kraja žice. Smanjeni unos topline smanjuje mogućnost nastajanja deformacija i zaostalih napetosti nastalih uslijed zavarivanja. Zbog tih karakteristika STT postupak najčešće se koristi za zavarivanje korijenskog zavora u grlu žljeba.

Proces zavarivanja odvija se ciklički, a postavljanjem ispravnih parametara osigurava se stabilnost električnog luka kao i stabilnost cjelokupnog procesa zavarivanja. Struja zavarivanja se regulira u mikrosekundama, ovisno o iznosu napona u električnom luku.

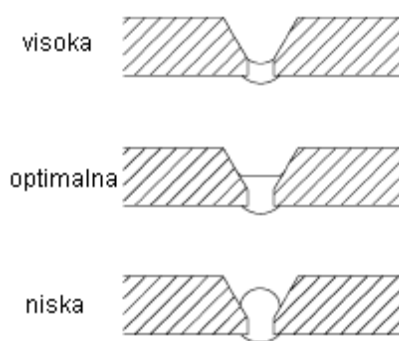
5.3.2. Parametri zavarivanja kod STT postupka

U odnosu na konvencionalni MAG postupak, STT pruža mogućnost podešenja više parametara. Parametri zavarivanja usklađuju se uglavnom sa specifikacijama koje proizvođač isporučuje sa dodatnim i osnovnim materijalom. Kod zavarivanja cijevi zavarivanje se većinom izvodi odozgo prema dolje silaznom tehnikom rada [12].

Parametri koji se namještaju kod STT postupka su sljedeći:

1. Vršna struja (Peak current, I_{PC})

Vršna se struja koristi za definiranje duljine luka te poboljšava vezivanje i protaljivanje stijenki osnovnog materijala. Utjecaj vršne struje na geometriju zavora prikazan je na slici 31.



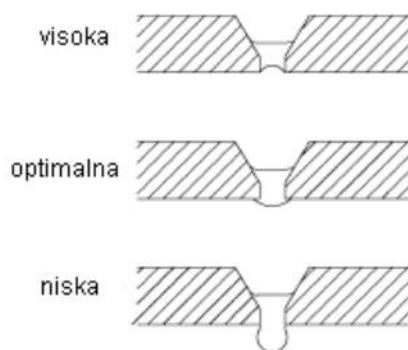
Slika 31. Utjecaj vršne struje na geometriju zavora [12]

Viša vrijednost vršne struje povećati će duljinu elektičnog luka, a ako je njena vrijednost previsoka kapljice će imati globularni oblik i preveliki promjer što povećava mogućnost rasprskavanja. U suprotnom slučaju, ako je vrijednost vršne struje preniska, električni luk postaje nestabilan. Vrijednost vršne struje mora se prilagoditi tako da se postigne minimalno prskanje i mirnoća kupke rastaljenog metala.

2. Pozadinska struja (Background current, I_{BC})

Pomoću pozadinske struje regulira se unos topline u zavareni spoj.

Ovim se parametrom također utječemo i na geometriju zavarenog spoja, gdje će prevelika vrijednost I_{BC} uzrokovati veći promjer kapljice i povećano prskanje taline. Ako je ta vrijednost niska električni luk je nestabilan i slabije je kvašenje na stranicama žljeba, kao je prikazano na slici 32.



Slika 32. Utjecaj pozadinske struje na geometriju zavara [12]

3. Topli/vrući start (Hot Start)

Ovaj parametar kod STT postupka zavarivanja omogućava lakšu uspostavu električnog luka te povećava unos topline kod početka zavarivanja, zbog toga što je radni komad u tom trenutku hladan pa postoji mogućnost hladnog naljepljivanja [12].

4. Gradijent silazne struje (Tailout)

Osigurava dodatan unos topline tako da kapljice rastaljenog materijala pritom nisu prevelike pri čemu ne dolazi do promjene duljine električnog luka. Povećanjem parametra poboljšava se kvašenje te se omogućuje veća brzina zavarivanja. Povećanjem vrijednosti *Tailout* parametra, vrijednosti vršne i pozadinske struje se smanjuju [12].

5. Brzina žice (v_z)

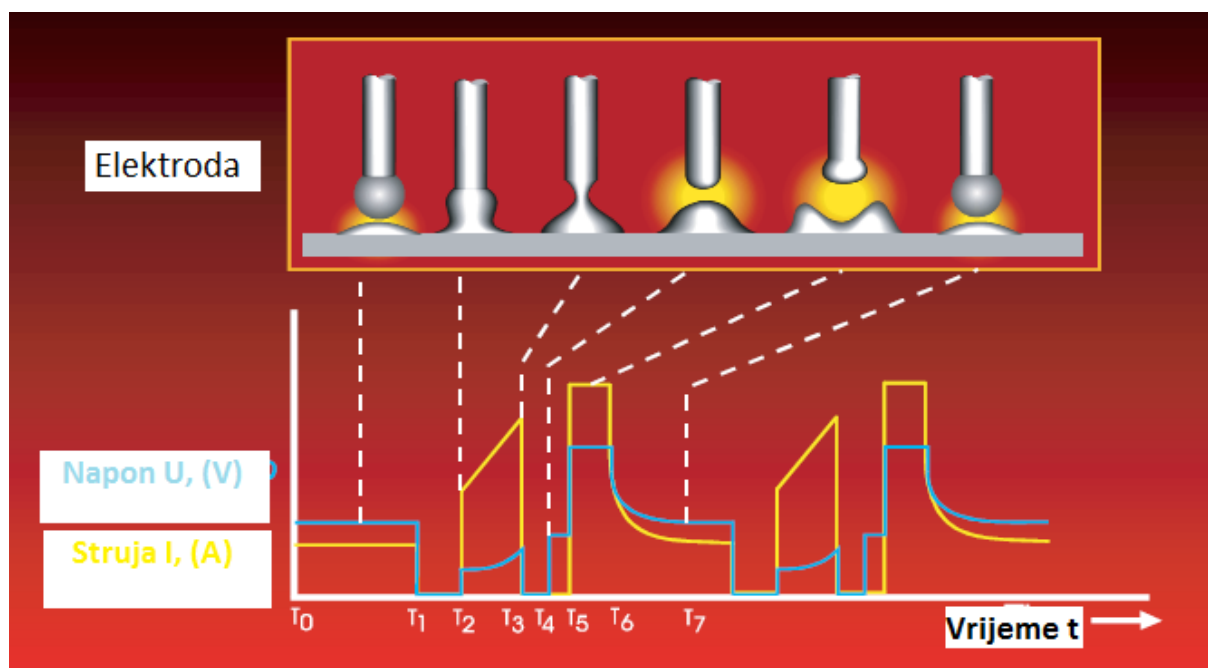
Ovaj parametar utječe na količinu rastaljenog materijala i jakost struje, ali je neovisan o vršnoj i pozadinskoj struji [12].

6. Slobodni kraj žice ($I_{skž}$)

Ovaj parametar utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, naličje zavara je konkavno i uže, a veća je i visina zavara. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi, ima manju visinu, tanak je, a povećava se i prskanje rastaljenog materijala [12].

5.3.3. Opis rada STT postupka zavarivanja

Princip rada STT postupka zavarivanja moguće je opisati pomoću dijagrama koji prikazuje promjene struje i napona u vremenu te pomoću slika odvajanja kapljice metala sa rastaljene žice u talinu metala. Slika 33. upravo opisuje promjene koje se događaju unutar jednog ciklusa te dijeli vremensku domenu ciklusa u šest karakterističnih faza.



Slika 33. Prikaz dinamičke karakteristike $U, I = f(t)$ [12]

Sljedećih šest koraka (slika 34.) opisuju karakteristične trenutke u fizici procesa STT postupka zavarivanja.

1. Pozadinska struja (I_{BC}) T_0 - T_1 :

Iznos struje u električnom luku prije nego što dođe do kratkog spoja između elektrode i osnovnog materijala. To je struja u stanju mirovanja koja iznosi od 50A do 100A, a u periodu T_0 - T_1 žica prilazi radnom komadu.

2. Ball time (stvaranje neodvojene kapljice metala) T_1 - T_2 :

To je trenutak u kojem elektroda još nije ušla u kratki spoj. Zbog djelovanja električnog luka dolazi do stvaranja taline na vrhu elektrode u obliku kapljice, koja se još nije odvojila od elektrode. Iznos struje još je uvijek jednak iznosu pozadinske struje I_{BC} . Nakon što uređaj očita nagli pad napona u električnom luku dolazi do smanjenja iznosa struje. Kod konvencionalnog MAG postupka došlo bi do kratkog spoja i naglog te intenzivnog povećanja struje. Pozadinska struja smanjuje se na vrijednost od otprilike 10A na period od 0.75 milisekundi.

3. Pinch efekt T_2 - T_3 :

Brzina žice je kontinuirana iako je došlo do naglog smanjenja iznosa struje, zbog čega dolazi do spajanja rastaljene kapljice metala sa vrha elektrode i kupke rastaljenog metala. Kako bi došlo do daljnjeg taljenja elektrode mora se povisiti iznos struje. Iznos struje povećava se kontinuirano, a elektroda je u kratkom spoju s radnim komadom. Kako je došlo do povećanog unosa energije povećanjem struje, tako se ubrzava odvajanje rastaljene kapljice u kupku rastaljenog metala. Volumen kapljice se povećava, a presjek koji spaja kapljicu sa elektrodom d_z se smanjuje pa je radijalna komponenta elektromagnetske sile sve veća. Dolazi do pojave pinch efekta i drastičnog smanjenja d_z sve do trenutka T_3 . Tijekom perioda T_2 - T_3 napon u električnom luku nije 0, a razlog tome je visoki otpor čelika pri točki taljenja od 1550°C. U trenutku T_3 dolazi do stvaranja suženja između rastaljene kapljice i elektrode.

4. Uspon napona dv/dt T_2 - T_3 :

Funkcija uspona napona služi za indicaciju trenutka u kojem dolazi do potpunog odvajanja kapljice rastaljenog metala od elektrode. Riječ je o prvoj derivaciji brzine promjene napona kratkog spoja po vremenu. U trenutku kad vrijednost prve derivacije spomenute funkcije postigne otprije zadanu vrijednost, dolazi do ponovnog smanjenja struje na vrijednost od 50A u nekoliko mikrosekundi. Time se sprječava naglo odvajanje kapljice metala koje bi uzrokovalo prskanje taline po radnom komadu. U trenutku T_4 dolazi do odvajanja rastaljene kapljice (zbog površinske napetosti) u kupku rastaljenog metala, ali pri niskoj vrijednosti struje zavarivanja.

5. Odvajanje kapljice metala T_3 - T_4 :

Iznos struje jednak je vrijednosti pozadinske struje. U trenutku T_4 dolazi do odvajanja kapljice metala, ali pri niskoj vrijednosti struje.

6. Impuls struje T_5 - T_6 :

Dolazi do ponovnog naglog, ali kontroliranog povećanja struje, a kao posljedica toga stvara se šav zavarenog spoja uz vrlo malo prskanja. U ovom periodu ciklusa dolazi do brzog taljenja elektrode, nakon što je kapljica u prošlom periodu odvojena. U ovom trenutku oblik rastaljene elektrode vrlo je nepravilan.

6. Smanjenje intenziteta struje T_6 - T_7 :

Struja se smanjuje sa visoke vrijednosti na vrijednost pozadinske struje. Karakteristično za ovaj period je da promjena struje nije skokovita, odnosno ne dešava se u kratkom periodu vremena. Zbog toga se taj period naziva „tail-out“. Nakon tog perioda dolazi do ponavljanja cijelog ciklusa, a vrijeme potrebno za jedan ciklus iznosi od 25 do 35 milisekundi.

5.4. Modificirani MAG postupak zavarivanja: FastRoot postupak zavarivanja

FastRoot je modificirani postupak zavarivanja kratkim spojevima, uz digitalno upravljanje parametarima struje i napona. Namjena mu je za zavarivanje korijena zavarenog spoja, te za zavarivanje tankih limova, konstrukcijskih i nehrđajućih čelika. Moguće je zavarivanje u svim položajima rezultirajući adekvatnom penetracijom bez prskanja.

Razvoj digitalnih izvora za zavarivanje pruža nove načine mogućnosti upravljanja prijenosom metala u električnom luku. Digitalni sustavi poboljšavaju vrijeme odaziva sustava na parametre zavarivanja što je jedan od razloga zašto novi modificirani postupci zavarivanja nalaze sve češće svoju primjenu na tržištu. U postupku MIG/MAG zavarivanja kontroliranim upravljanjem vrijednostima napona i struje kratkog luka postiže se prijenos rastaljenog metala bez štrcanja i luk stabilnih karakteristika. Upravo pri zavarivanju korijenskog prolaza kontrola štrcanja i penetracije predstavljaju najveći problem.

Prednosti FastRoot postupka su jednostavnost uporabe i fleksibilnost. Ukoliko je zavarivač koristio klasični MAG postupak, vrijeme privikavanja na opremu i postupak FastRoot zavarivanja je minimalno. FastRoot postupak omogućava zavarivanje raznih metala, od konstrukcijskih čelika, do nehrđajućih duplex čelika [12].

Najveća prednost FastRoot postupka zavarivanja je mogućnost zavarivanja korijena i mogućnost zavarivanja popune i završnog sloja. Korištenjem istog izvora struje, dodavača žice i pištolja za zavarivanje uz podešavanje parametara zavarivanja i dobave dodatnog materijala moguće je zavariti sva tri prolaza.

5.4.1. Karakteristike FastRoot postupka zavarivanja

FastRoot izvor struje nema određenu karakteristiku struje. Na osnovu trenutnih zahtjeva koji se određuju neposredno iz stanja električnog luka, uređaj osigurava parametre koji omogućuju zavarivanje kratkim spojevima, a rastaljena kapljica metala se prenosi sa vrha elektrode u kupku metala bez prskanja. Sve to omogućuje programski upravljani izvor struje koji regulira struju i napon zavarivanja [12].

Posebnost FastRoot izvora struje je ta što su krivulje struje i napona programirane u sam uređaj pa zavarivač mora odrediti osnovni i dodatni materijal koji se koriste te zaštitni plin. Nakon unosa tih podataka uređaj sam generira vrijednosti struje i napona te brzinu žice. Ukoliko za tim postoji potreba postoji i naknadna mogućnost finog podešenja tih programiranih vrijednosti.

Takav način podešavanja vrijednosti struje i napona naziva se „Synergic“ sustav. Sinergijsko podešavanje parametara omogućuje digitalni način upravljanja parametrima struje i napona. Sama memorija FastRoot uređaja za zavarivanje u sebi sadrži parametre za niz kombinacija osnovnog i dodatnog materijala te zaštitnog plina. Ukoliko se pojavi potreba za razvojem novih upravljačkih krivulja struje i napona zavarivanja na sučelju upravljačke ploče nalazi ulaz koji omogućuje programiranje tih krivulja.

Unatoč sinergijskom određivanju parametara i digitalnom upravljanju procesom, FastRoot postupak nije MAG postupak s impulsnim načinom prijenosa metala. Riječ je o modificiranom MAG postupku sa prijenosom metala kratkim spojevima. Proces zavarivanja odvija se tako da uređaj prati vrijednosti struje i napona u električnom luku te upravlja vremenskim usklađivanjem prijenosa kapljice rastaljenog materijala od elektrode do kupke rastaljenog metala [12].

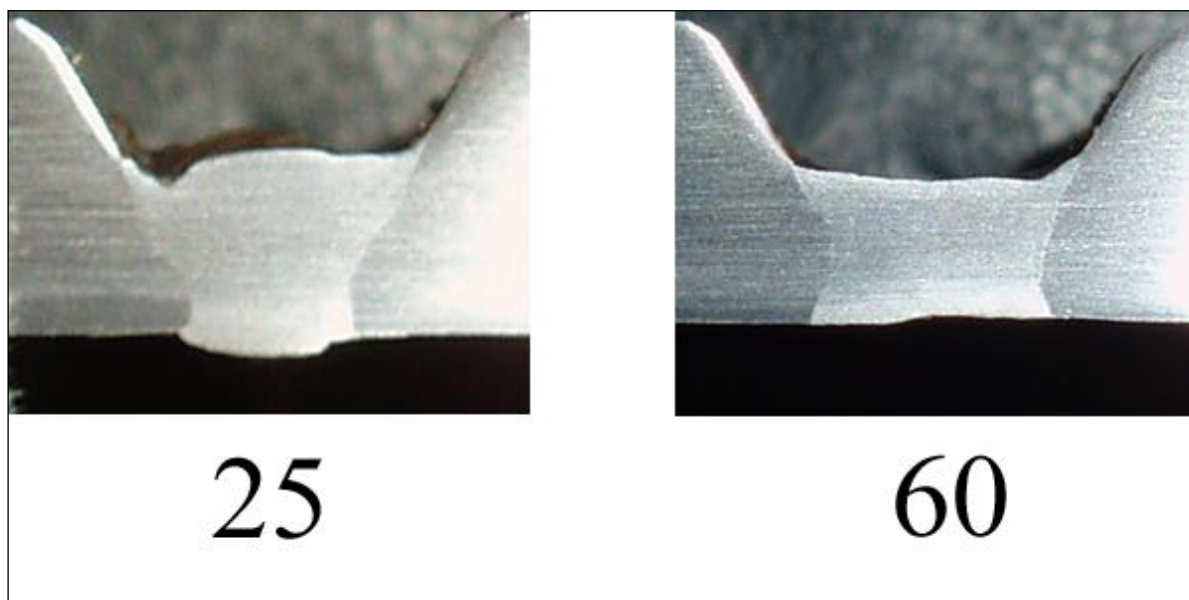
3.2.2. Parametri zavarivanja kod FastRoot postupka

Kod FastRoot postupka zavarivanja omogućeno je podešavanje većeg broja parametara nego kod klasičnog MAG zavarivanja. Parametri zavarivanja usklađuju se sa specifikacijom koju proizvođač isporučuje sa osnovnim, odnosno dodatnim materijalom. Zbog toga što su struja i napon zavarivanja, kao i brzina žice unaprijed određeni samim programom uređaja sinergijsko definiranje parametara uvelike olakšava uporabu FastRoot postupka zavarivanja. Parametri čija se vrijednost može mijenjati bez obzira na unaprijed određene vrijednosti programa su brzina dobave žice, razina drugog uzlaznog stanja (FPu razina struje) i razina osnovne struje.

Parametri koji se namještaju kod FastRoot postupka su sljedeći:

1. Osnovna struja zavarivanja

Prevelika vrijednost osnovne struje zavarivanja rezultirati će nedovoljnim provarivanjem korijena zavora (slika 34.).



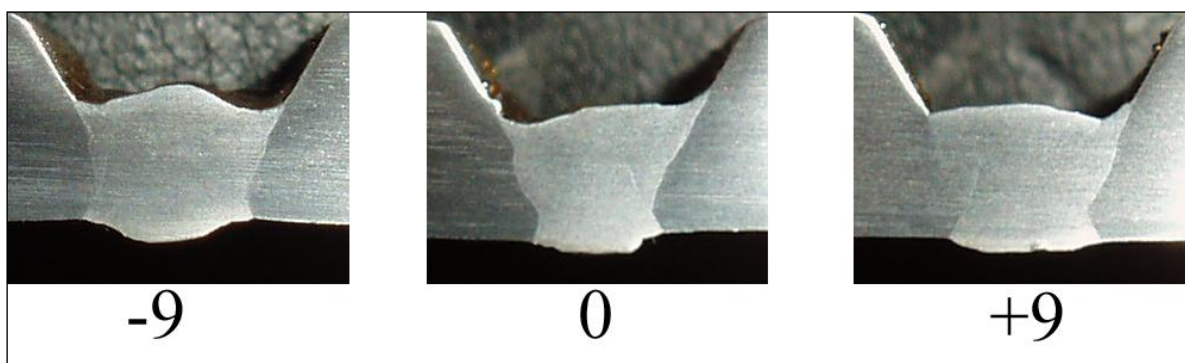
Slika 34. Utjecaj osnovne struje zavarivanja na geometriju zavarenog spoja [14]

2. Razina drugog uzlaznog stanja (FPu razina struje)

Podešavanjem FPu razine struje utječe se na stabilnost električnog luka i količinu štrcanja. Vrijednosti od -1 do -9 dati će mekši luk i smanjenje količine štrcanja, dok će vrijednosti od +1 do +9 rezultirati tvrdim lukom povećane stabilnosti.

Također, vrijednosti FPu razine struje od +1 do +9 koriste se pri zavarivanju čelika u zaštitnoj atmosferi 100% CO₂ te za zavarivanje tankih limova ugljičnih konstrukcijskih čelika.

Raspon u kojem se FPu parametar može podešavati poprima vrijednosti od -9 do +9. Riječ je o bezdimenzijskom parametru čija tvornička vrijednost iznosi 0. FPu razina struje neposredno utječe na geometriju zavarenog spoja, a njen utjecaj prikazan je na slici 35.



Slika 35. Utjecaj FPu razine na geometriju zavarenog spoja [14]

3. Vrući start (Hot Start)

Omogućuje lakšu uspostavu električnog luka povećanjem unosa topline kod početka zavarivanja, zbog toga što je radni komad u tom trenutku hladan pa postoji mogućnost hladnog naljepljivanja.

4. Brzina žice (v_z)

Utječe na količinu rastaljenog materijala, a ovisan je o osnovnoj struji zavarivanja. Dakle povećanjem brzine žice dolazi do povećanja osnovne struje zavarivanja.

5. Slobodni kraj žice

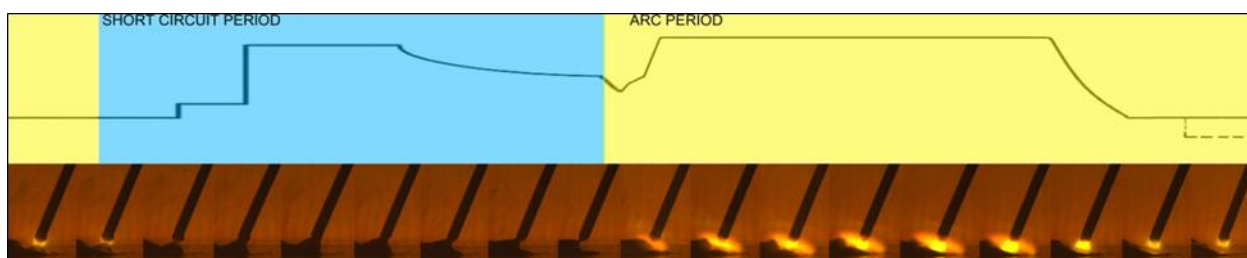
Utječe na geometriju zavarenog spoja. Ako je vrijednost slobodnog kraja žice velika, naličje zavora je konkavno i uže, a veća je i visina zavora. Za manju duljinu slobodnog kraja žice zavar je širi, ima manju visinu, tanak je, a povećava se i prskanje rastaljenog materijala.

5.4.2. Opis rada FastRoot postupka zavarivanja

Princip rada FastRoot postupka temelji se na dva uzajamno različita oblika struje zavarivanja. Ovi oblici se odnose na kratke spojeve i uzlaznu struju električnog luka (Slika 37.). FastRoot postupak je modificirani postupak kratkih spojeva i ne smije ga se zamijeniti sa impulsnim zavarivanjem. U prvom uzlaznom stanju, dodatni materijal se prenosi u rastaljenu kupku kratkim spojem, za to vrijeme struja električnog luka se iznenadno pojačava za vrijeme drugog uspona (FPu) i podržava na željenoj razini [14]. Postoji kratki strujni maksimum za vrijeme kojeg žica dodatnog materijala dodiruje rastaljenu kupku prije prvog uzlaznog stanja. Za vrijeme prvog uzlaznog stanja zbog brzog povećanja struje na željenu razinu nastaje tzv. „pinch“ efekt, koji potpomaže kapljici da se odvoji od vrha žice (dodatnog materijala). Odvajanje je zatim osigurano sporim povećanjem struje. Kad je kapljica prenešena do rastaljene kupke tada počinje drugo uzlazno stanje struje (FPu) i tada se inicira električni luk. Praćenje parametara zavarivanja odvija se kroz električni luk, a na temelju dobivenih informacija uređaj regulira parametre u kratkom vremenskom intervalu. Povećanja i smanjenja struje vremenski su usklađena kako bi se spriječilo štrcanje pri prijelazu od kratkog

na slobodni luk. Tzv. drugo uzlazno stanje (FPu) oblikuje rastaljenu kupku i osigurava dovoljnu penetraciju korijenskog prolaza. Ova dva uzlazna stanja slijede jedan iza drugog, nakon kojih dolazi do redukcije struje do željene razine osnovne struje. Specificirana osnovna struja osigurava da slijedeća kap bude prenesena u slijedećem kratkom spoju [14].

Brzo i vremenski usklađeno upravljanje izvorom u kombinaciji s ispravnim oblikom upravljačke krivulje struje u postupku omogućuje neometano odvajanje kapljice bez štrcanja u rastaljenu kupku. Tako se zadržava stabilan električni luk i omogućava jednostavno upravljanje postupkom zavarivanja [12]. Na slici 36 prikazano je odvajanje kapljice rastaljenog materijala u kupku a usporedno s tim i dva ulazna stanja (ulazne struje).



Slika 36. Prikaz odvajanja kapljice rastaljenog materijala u kupku [14]

Kako su vrijednosti struje i napona električnog luka tokom zavarivanja kod FastRoot postupka digitalno regulirane moguće je preko sučelja programa generiranje upravljačkih krivulja. Nakon što se definiraju vrijednosti struje i napona, postoji mogućnost spajanja računala sa uređajem za zavarivanje preko serijskog kabela kao bi učitali nove upravljačke krivulje.

Upravljačke krivulje generiraju se na temelju osnovnog materijala, vrsta te promjer žice dodatnog materijala te zaštitni plin. Ako dođe do potrebe za razvijanjem novih upravljačkih krivulja zbog razvoja dodatnih materijala i zaštitnih plinova, postoji mogućnost za učitavanje tih krivulja u uređaj za zavarivanje što pokazuje fleksibilnost cijelog sustava.

6. EKSPERIMENTALNI RAD

U eksperimentalnom dijelu na uzorcima čelika gradacije API 5L X80 koji je zavaren MAG postupkom zavarivanja napravljeni su makroizbrusci koji su u daljnjem tijeku eksperimentalnog dijela upotrijebljeni za analizu makro i mikrostrukture. Mikrostruktura zavara je analizirana u području metala zavara i zoni utjecaja topline a ovisno o unosu topline tijekom zavarivanja, temperaturi predgrijavanja i vrsti zaštitnog plina. Na makroizbruscima je ocijenjena kvaliteta zavarenog spoja mjerenjem tvrdoće te geometrije zavara, te su rezultati uspoređeni sa zahtjevima norme HRN EN 15614-1. Na temelju dobivenih rezultata napravljena je analiza te su dobiveni zaključci o optimalnim vrijednostima parametara zavarivanja s gledišta postizanja povoljne mikrostrukture a time i svojstava.

6.1. Opis eksperimenta

Eksperimentalni dio rada u potpunosti je napravljen na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Zavarivanje radnih komada napravljen je na robotskoj stanici u Laboratoriju za zavarene konstrukcije. Priprema uzoraka za mikro i makrostrukturu napravljeni su u Laboratoriju za materijalografiju.

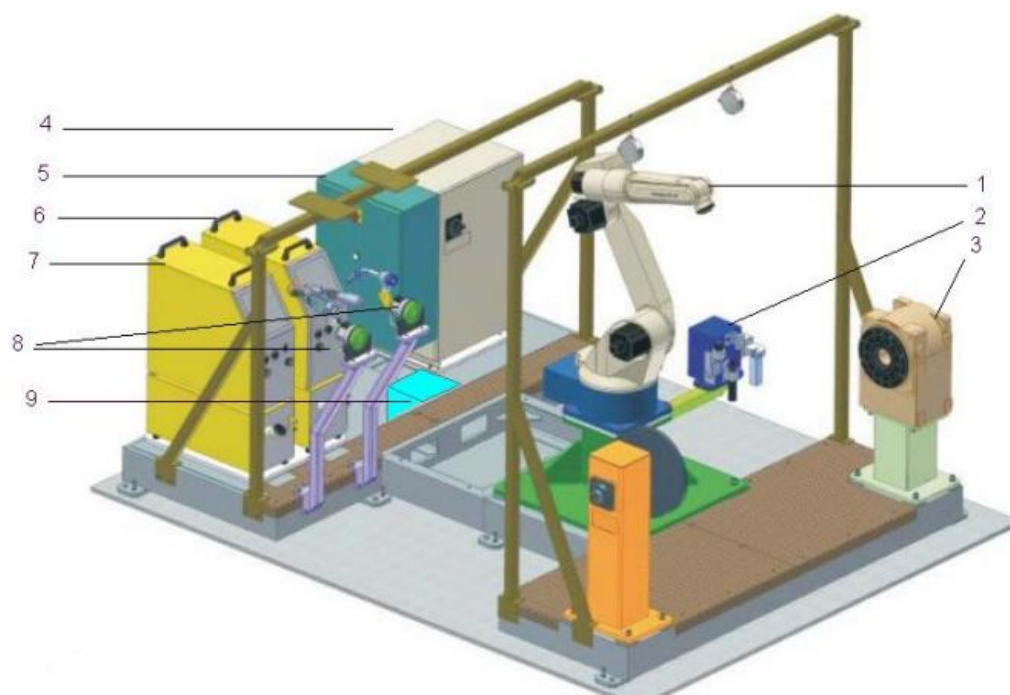
Uzorci za zavarivanje izrađeni su iz materijala dimenzija 350x300x10mm. Iz ploče materijala, nakon sučeonog zavarivanja, plinskim postupkom su izrezani uzorci za ispitivanje prema normi EN 15614-1:2004 - Specifikacija i klasifikacija postupka zavarivanja za metalne materijale - Test postupka zavarivanja - Dio 1: Elektrolučno i plinsko zavarivanje čelika i elektrolučno zavarivanje nikla i niklovih legura. Izrezani uzorci naknadno su strojno obrađeni. Strojna obrada je uključivala prvotnu obradu na blanjatici te završnu obradu brušenjem.

Svi uzorci predviđeni za ispitivanje zavareni su MAG (Metal Active Gas) postupkom zavarivanja na robotskoj stanici Almaga AX V6.

6.1.1. Robotska stanica VRC-1G MIG + 1G TIG/1dm

Robotska stanica (prikazana slikom 37) sastoji se od:

1. robota OTC Almega AX-V6,
2. uređaja za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenja sredstva protiv naljepljivanja, kapljica,
3. pozicionera P250V ROBO,
4. električne jedinice,
5. upravljačke jedinice,
6. izvora struje MIG/MAG VPS 4000,
7. izvora struje TIG VARTIG 3500 DC/AC,
8. sustava za automatsku izmjenu pištolja,
9. senzora električnog luka AX-AR.



Slika 37. Prikaz robota Almega AX -V6 [2]

Funkcija Synchronmotion koja objedinjuje složeno gibanje robota i pozicionera, integrirana je sustav i osigurava konstantnu brzinu zavarivanja i nagib pištolja pri zavarivanju složenih oblika i proizvoda. U sustavu se nalaze izvora struje za zavarivanje i to za MIG/MAG VPS 4000 i TIG VARTIG 3500 DC/AC, izmjena pištolja i načina zavarivanja je automatska. Oba izvora su vodom hlađene inverterske jedinice s mogućnošću impulsnog zavarivanja. To znači da na jednom proizvodu možemo izmijeniti TIG i MIG/MAG, ovisno o tehnološko - ekonomskim zahtjevima i trenutnim potrebama. Uz to, za MIG/MAG zavarivanje ugrađen je i alat za čišćenje sapnice, rezanje žice i nanošenje sredstva protiv naljepljivanja kapljica. Ugrađen je senzor električnog luka, za praćenje spoja pri zavarivanju, koji putanju gibanja regulira na osnovu napona električnog luka. U slučaju kolizije glave za zavarivanje i radnog komada, naprave i sl ugrađen je i tzv. „shock” senzor koji reagira ukoliko dođe do dodira. On-line programiranje se provodi pomoću privjeska za učenje pri čemu treba napomenuti da je programski paket kompatibilan s Windows OS. Podešavanje parametara zavarivanja provodi se preko privjeska za učenje tako da nema potrebe za dodatnim aktivnostima za podešavanje na samim izvorima struje za zavarivanje. Robotska stanica VRC-1G MIG+1G TIG / 1dm nalazi se u laboratoriju katedre za zavarene konstrukcije Fakulteta strojarstva i brodogradnje. Na slici 38 prikazan je robot OTC Almega AX-V6.



Slika 38. Robot OTC Almega AX-V6 [17]

6.1.2. Izvor struje za MIG/MAG zavarivanje - VPS 4000 digit

Izvor struje VPS 4000 digit, slika 30., omogućuje tri različita postupka zavarivanja: MIG/MAG klasično, MIG/MAG impulsno i REL zavarivanje obloženim elektrodama. Tehničke karakteristike ovog izvora struje prikazuje tablica 2. Sam robot prikazan je na slici 39. A izvor struje VPS 4000 digit prikazan je na slici 39.

Tablica 2. Tehničke karakteristike izvora struje VPS 4000 digit [17]

Priključni napon	3~400 V / 50 Hz
Područje struje zavarivanja	30 - 400 A
Napon 15,5 - 34 V	15,5 - 34 V
Intermitencija 50 %	400
Intermitencija 100 %	283 A
Promjer žice za zavarivanje	0,8 - 1,2 (1,6) mm

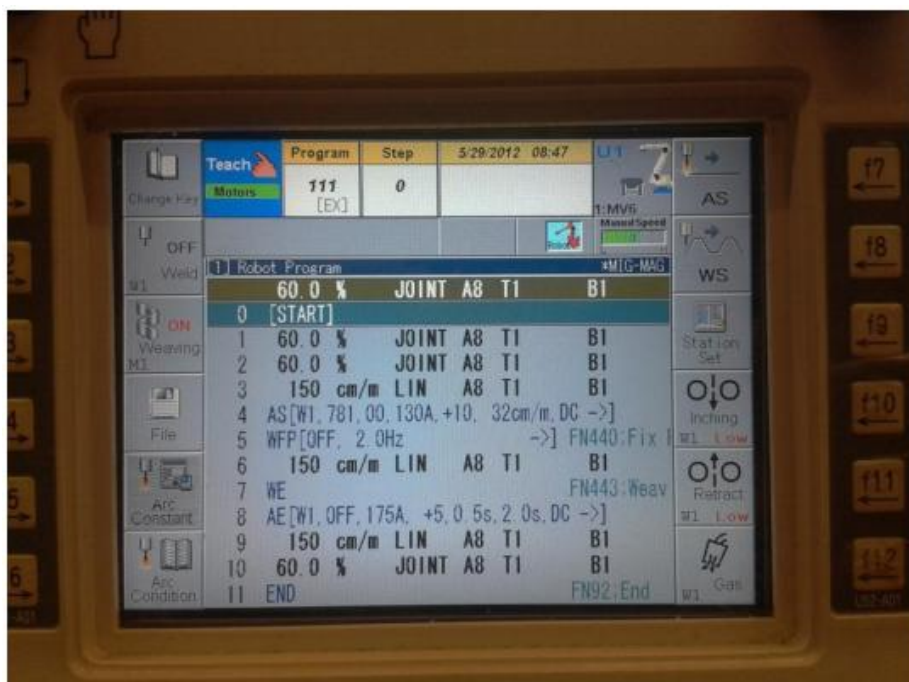


Slika 39. izvor struje VPS 4000 digit [12]

6.1.3. Izrada upravljačkog programa na robotskoj jedinici Almega AX V6

Programi korišteni za zavarivanje uzoraka izvođeni su korištenjem sustava za programiranje na samoj robotskoj jedinici. Nakon što su programom određeni parametri kao što su brzina i nagib pištolja, kretanje pištolja i njihanje, odredili su se parametri zavarivanja; struja, napon, slobodni kraj žice i protok zaštitnog plina.

Za zavarivanje korijena korišten je isti program u svih 17 stanja pokusa zbog toga što je kvalitetan korijen zavarenog spoja moguće izvesti u vrlo uskom području parametara zavarivanja. Kako su parametri zavarivanja u određenim stanjima pokusa bili vrlo različiti bilo je potrebno izvršiti određene promjene i na upravljačkom programu robotske jedinice. To se posebice odnosi na tehniku njihanja koja je bila potrebna u slučajevima kada se zbog većeg unosa topline javila potreba za kontrolom veće količine taline. Upravljački program korišten za zavarivanje korijena pohranjen je u memoriju robota kao program 111, slika 40.



Slika 40. Upravljački program 111 [17]

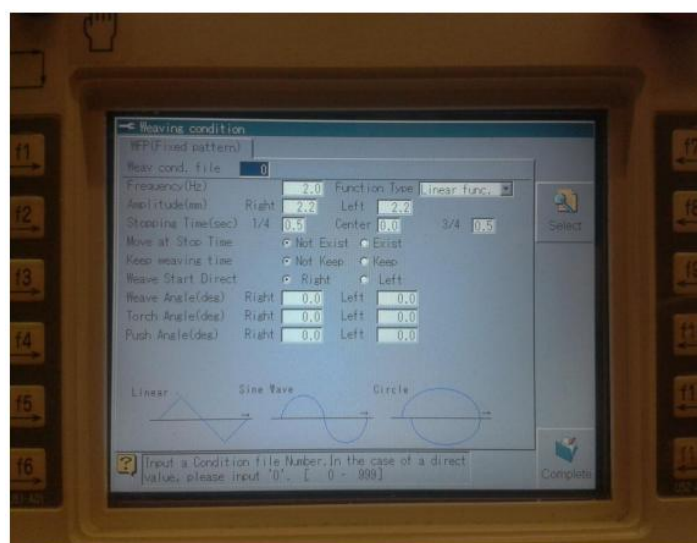
Slika 41 prikazuje upravljački program 778 korišten za zavarivanje popune i završnog sloja.

U upravljačkom programu 111 korištenom za zavarivanje korijena, bilo je potrebno definirati vrijednosti koje determiniraju putanju i brzinu njihanja. Njihove su vrijednosti prikazane na slici 42.



Slika 41. Upravljački program 778 [17]

Kao funkcija njihanja odabrana je linearna funkcija, a vrijeme zadržavanja električnog luka na obje strane lima iznosi 0,5 sekundi. Amplituda njihanja iznosi 2,2 mm u obje strane, dok je frekvencija njihanja 2Hz [2].



Slika 42. Parametri njihanja programa 111 [17]

6.1.4. Priprema uzoraka za makro i mikroanalizu

Nakon zavarivanja uzorci su strojno obrađeni blanjanjem kako bi se postigle planparalelne površine što je izrazito bitno kod mjerenja tvrdoće. Nakon blanjanja uzorci su brušeni brusnim papirom rastućih veličina zrnatosti i to redom: 120, 240, 320, 400, 500, 600. Prilikom prelaska na finiji brusni papir smjer brušenja uvijek je mijenjan za 90°.

Za potrebe makro i mikrostrukture napravljeno je naknadno brušenje uzoraka na uređaju Phoenix Alpha Grinder Polisher (slika 43.) na kojem se kao sredstvo za hlađenje koristi voda. Uzorci su se brusili na brusnom papiru od silikon-karbida sa brzinom 300 okr/min za sve finoće brusnog papira. Phoenix Alpha Grinder Polisher prikazan je na slici 43.



Slika 43. Phoenix Alpha Grinder Polisher uređaj sa vodenim hlađenjem [18]

Tijekom brušenja korišteni su brusni papiri slijedećih zrnatosti, redom: 1200, 2500, 4000. Poslije svake promjene brusnog papira mijenjan je smjer brušenja za 90°, uzorci su ispirani vodom u svrhu uklanjanja nečistoća.

Nakon brušenja, uzorci su polirani na uređaju DAP-V (slika 44) brzinom od 150 okr/min. U svrhu poliranja kao brusna ploča korištena je tkanina i dijamantna pasta Diamond Polishing Compound 1um.



Slika 44. Uređaj za poliranje DAP-V [18]

Tijekom poliranja uzorci su hlađeni tekućinom DP - Lubricant Blue, slika 45. Nakon poliranja uzorci su očišćeni etilnim alkoholom i suhom vatrom.



Slika 45. DP - Lubricant Blue - tekućina za rashlađivanje

Za potrebe mikrostrukturnih ispitivanja uzorci su, nakon poliranja nagrizeni u 3%-tnoj otopini dušične kiseline HNO_3 u destiliranoj vodi, nakon čega su isprani u alkoholu i osušeni. Mikrostrukture su obrađivane na mikroskopu Olympus GX51 Analy (slika 46.) i na softveru „AnalASIS Doc“. Za potrebe naknadne analize makrostrukture uzorci su nagrizeni 7%-tnom otopinom dušične kiseline HNO_3 u destiliranoj vodi, nakon čega su isprani u alkoholu i

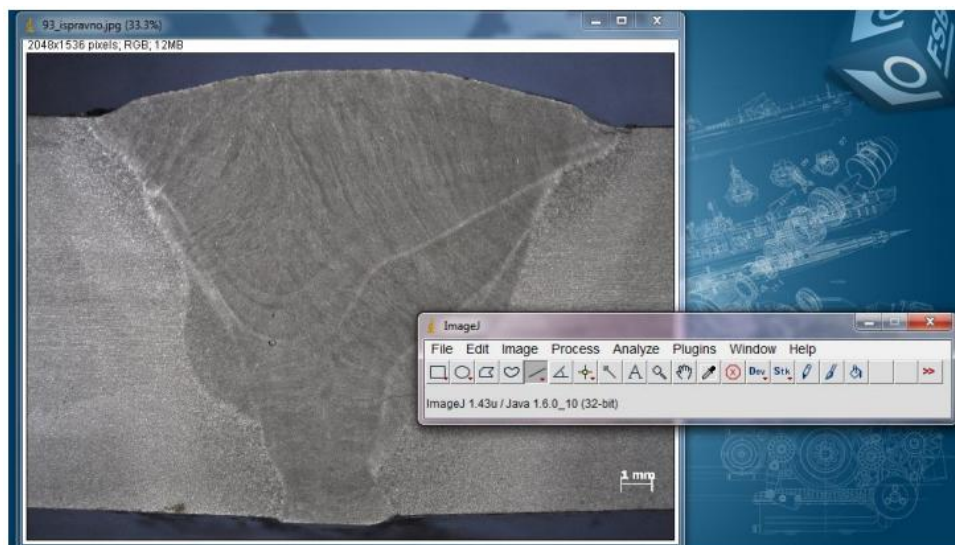
sušeni fenom. Nakon nagrizanja makrostrukture su slikane pomoću mikroskopa Olympus GX51 Analy (slika 46) i pripadajućeg softvera „AnalaSIS Doc“.



Slika 46. Mikroskop Olympus GX51 Analy [18]

6.1.5. Ispitivanje geometrije zavora

Ispitivanje geometrije je provedeno uz pomoć programskog software-a „Image J“ čiji se rad bazira na pretvaranju izmjerenih pixela, dijela slike, u mjerne jedinice, primjerice milimetre, na način da se prethodno definira odnos milimetra i pixela pomoću mjernog sredstva koje mora biti uslikano zajedno s ispitnim uzorkom. Grafičko sučelje programa „Image J“ prikazano je na slici 47.



Slika 47. Sučelje i alatna traka programa „Image J“

6.1.6. Mjerenje tvrdoće po Vickersu

Ispitivanje tvrdoća uzoraka obavljeno je na Vickers tvrdomjeru, modela HV10 ($F = 98,04 \text{ N} \sim 10 \text{ kp}$), prema standardu EN ISO 6507-1:2005. Tvrdoća se ispituje okomito na metal zavora, zonu utjecaja topline i osnovni materijal. Na slici 48 prikazan je uređaj za mjerenje tvrdoće u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.



Slika 48. Uređaj za mjerenje tvrdoće po metodi Vickers [17]

6.2. Osnovni materijal

Kao osnovni materijal u ovome eksperimentalnom radu korišten je čelik API 5L X80. To je čelik visoke čvrstoće koji se koristi za izgradnju cjevovoda.

U tablici 3. prikazan je kemijski sastav čelika API 5L X 80, broj šarže 780670.

Tablica 3. Kemijski sastav osnovnog materijala X80

Kemijski element	Maseni udio (%)
C	0,065
Si	0,330
Mn	1,970
P	0,015
S	0,0004
Al	0,034
Cr	0,17
Ni	0,18
Mo	0,02
Cu	0,09
V	0,001
Nb	0,062
Ti	0,004
N	0,0037
B	0,0009
Fe	ostatak
Ekvivalent ugljika	0,196

U tablici 4 prikazane su vrijednosti mehaničkih svojstava korištenog osnovnog materijala.

Tablica 4. Mehanička svojstva čelika gradacije API 5L X80

Gradacija čelika	$R_{p0,5}$	R_m	A
X80	557 N/mm ²	650 N/mm ²	20%

Prema normi API 5L za čelike s manje od 0,12% ugljika ekvivalent ugljika se izračunava prema Itto-Bessyo formuli [3]:

$$\text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad \text{---} \quad (2)$$

pri čemu P_{cm} ne smije biti veći od 0,25 %.

Za šaržu čelika primijenjenu u ovom eksperimentalnom radu P_{cm} iznosi 0,196.

Za čelik gradacije X80 kemijskog sastava zadanog prema tablici 3 nije potrebno predgrijavanje, no za potrebe eksperimentalnog rada radni komadi su se predgrijavali prema vrijednostima temperature predgrijavanja iz tablice 6 (odlomak 6.6.). U stanjima pokusa u kojima se osnovni materijal predgrijavao, temperatura predgrijavanja bila je jednaka međuprolaznoj temperaturi, dakle nakon svakog prolaza čekalo se kako bi se temperatura smanjila na temperaturu predgrijavanja.

6.3. Dodatni materijal

Za zavarivanje lima korištena je žica za MAG zavarivanje LNM MoNi proizvođača Lincoln Electric promjera $d_z = 1,2\text{mm}$, čiji je atest dan u prilogu.

Navedena žica je klasificirana kao dodatan materijal koji se koristi za zavarivanje visokočvrstih čelika. Osim toga, zadovoljava zahtjeve na žilavost do -40 °C .

Mehanička svojstva dodatnog materijala prikazana su tablicom 5.

Tablica 5. Mehanička svojstva dodatnog materijala LNM MoNi

Re, N/mm ²	Rm, N/mm ²	A(%)	udarna radnja loma KV(J)		
			pri -20°C	pri -40°C	pri -60°C
625	770	19	100	90	70

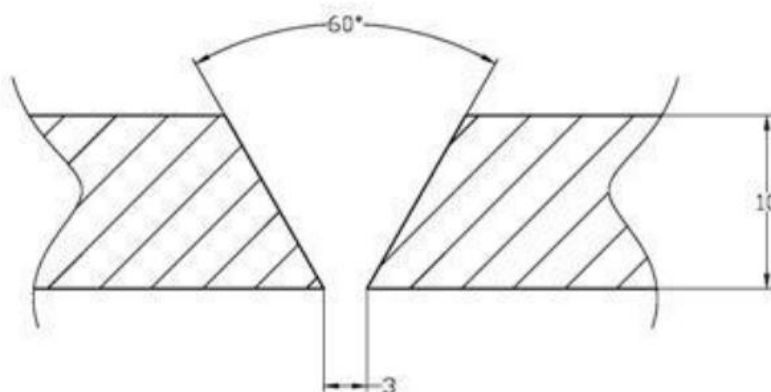
Kemijski sastav dodatnog materijala prikazan je tablicom 6.

Tablica 6. Kemijski sastav dodatnog materijala

C(%)	Mn(%)	Si(%)	Ni(%)	Cr(%)	Mo(%)	Cu(%)
0,1	1,65	0,75	0,55	0,6	0,3	0,08

6.4. Priprema spoja

Priprema spoja kao i parametri za zavarivanje postupaka korištenih u eksperimentu određeni su na temelju proučene literature. Debljina stjenke cijevi uvjetovala je da zavareni spoj bude izveden u tri ili četiri prolaza, ovisno o unosu topline. Priprema je izvedena kao V- spoj otvora od 60°. Razmak između ploča iznosi 3mm. Skica pripreme spoja sa odgovarajućim izmjerama prikazan je na slici 49.



Slika 49. Skica pripreme zavarenog spoja

Iz ploča osnovnog materijala API 5L dimenzija 300x350x10 mm napravljena je priprema spoja na automatskoj plinskoj rezačici u Laboratoriju za zavarene konstrukcije.

6.5. Oblikovanje plana pokusa

Najznačajniji je faktor koji utječe na oblik zavara, njegovu geometriju, te mikrostrukturne promjene tijekom i nakon unosa topline procesom taljenja je sam unos topline tijekom postupka zavarivanja. Također, postoje i drugi faktori koji utječu na svojstva zavara neki od kojih su sastav zaštitnog plina prilikom zavarivanja te temperatura predgrijavanja radnog komada.

U eksperimentalnom dijelu ovog rada cilj je analiza pojava i promjena svojstava zavarenog spoja u vidu mikrostrukture, makrostrukture te mjerene tvrdoće.

Upotrijebio se plan pokusa koji će dati najviše informacija s najmanjim brojem ispitivanja uz potrebnu točnost rezultata.

Odabran je centralno kompozitni plan pokusa čija je svrha generiranje matematičkog modela, odnosno jednadžbe (polinoma II. stupnja) koja opisuje proces. Centralno kompozitni plan pokusa je model I. reda ($2k$) proširen dodatnim točkama (stanjima pokusa) u centru i točkama u osima da bi se omogućila procjena parametara modela II. reda. Centralno kompozitni plan pokusa sastoji se od $2k$ stanja u vrhovima (faktorska stanja), $2k$ stanja u osima i stanja u središtu (k - broj faktora). Centralno kompozitni plan pokusa je alternativa $3k$ modelu pri sastavljanju modela pokusa II. reda je jer broj izvođenja smanjen u usporedbi s potpunim faktorskim modelom pokusa [19].

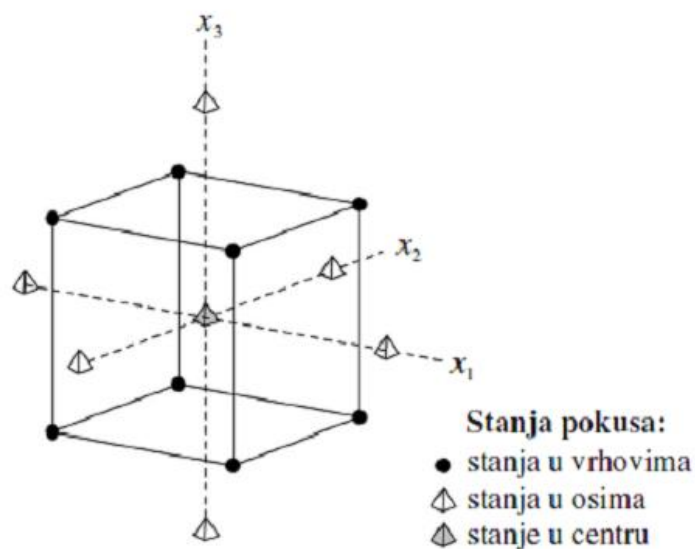
Broj pokusa N , koji je potreban unutar ove analize je [20]:

$$(3)$$

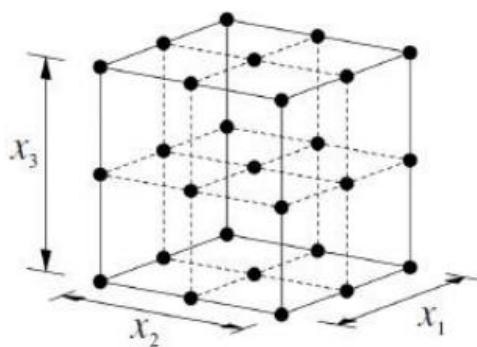
gdje je:

- k - broj faktora
- n_0 - broj ponavljanja.

Za $k = 3$ (faktori su x_1, x_2, x_3) na slici 50 je prikazan model kompozitnog pokusa za koji je potrebno 15 stanja pokusa (broj ponavljanja n_0 je jednak 1). U slučaju potpunog faktorskog plana pokusa (slika 51) bilo bi potrebno 27 stanja pokusa [19].



Slika 50. Model centralno kompozitnog pokusa sa tri faktora i jednim ponavljanjem [19]



Slika 51. Model potpunog faktorskog plana pokusa $3k$ [19]

Poželjna karakteristika svakog pokusa je međusobna nezavisnost procjena glavnih faktora i njihovih interakcija, što se postiže ortogonalnošću i rotabilnošću pokusa.

Rotabilnost centralno kompozitnog pokusa postiže se dodavanjem stanja pokusa tako da su sva stanja jednako udaljena od centra pokusa, odnosno rotabilnost ovisi o tzv. osnoj udaljenosti a (udaljenost stanja pokusa u osima od centra pokusa) [19].

Pokus je rotabilan, ukoliko je [19]:

$$— \quad (4)$$

gdje je F - broj faktorskih stanja.

Za određivanje plana pokusa u eksperimentalnom radu odabrana su $k = 3$ faktora uz $n_0 = 3$, odnosno 3 broja ponavljanja. Faktori su unos topline, temperatura predgrijavanja te sastav zaštitnog plina. Prema (3) ustanovljeno je da je potrebno izvesti 17 stanja pokusa sa 3 ponavljanja. Prema (4) za broj faktora $k = 3$, osna udaljenost $a = 1,682$.

Notacija koja je primijenjena pri označavanju uzoraka je slijedeća:

- prva, odnosno prve dvije broječne oznake označava broj stanja pokusa,
- zadnja broječna oznaka označava redni broj ponavljanja za dotično stanje pokusa.

Za potrebe ispitivanja koja su određena ovim eksperimentom, 8 stanja pokusa su podvrgnuta ispitivanju, i to stanja pokusa od 1. do 8. uključno. S obzirom da svako stanje pokusa ima 3 ponavljanja, za potrebe ovog rada bilo bi previše uzimati na razmatranje svih 17 stanja pokusa.

U tablici 7 navedena su stanja pokusa od rednog broja 1, pa do 8 sa odgovarajućim oznakama uzoraka prema stanjima pokusa.

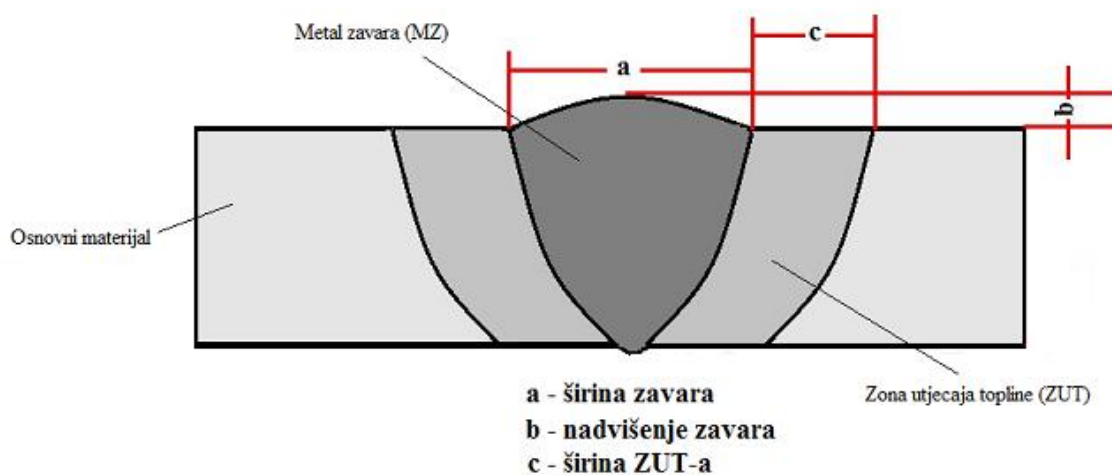
Tablica 7. Stanje pokusa

stanje pokusa	udio CO ₂ u Ar		unos topline		temperatura predgrijavanja	
	[%]	razina	[kJ/cm]	razina	[°C]	razina
1	12	-1	10	-1	45	-1
2	24	1	10	-1	45	-1
3	12	-1	14	1	45	-1
4	24	1	14	1	45	-1
5	12	-1	10	-1	115	1
6	24	1	10	-1	115	1
7	12	-1	14	1	115	1
8	24	1	14	1	115	1

7. REZULTATI MJERENJA, ANALIZA I RASPRAVA

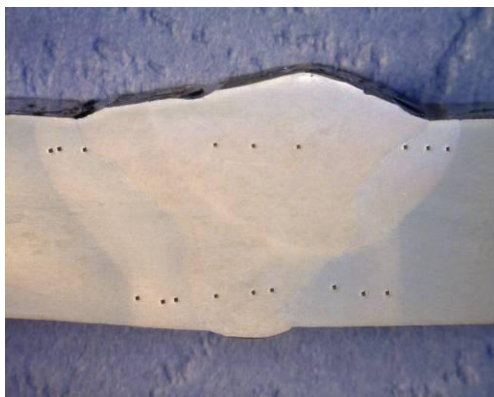

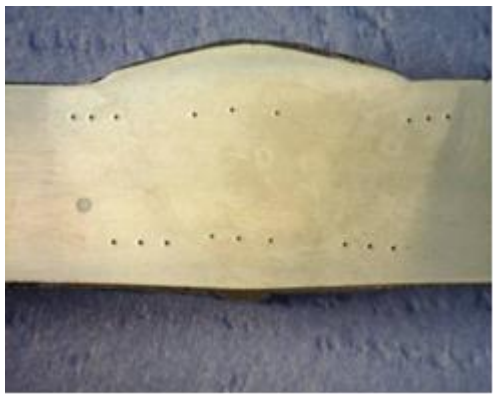
7.1. Analiza makrostrukture

U tablici 8. prikazani su makroizbrusci načinjeni iz uzoraka zajedno sa izmjerenim vrijednostima karakterističnih geometrijskih veličina određenih i izmjerenih prema slici 52

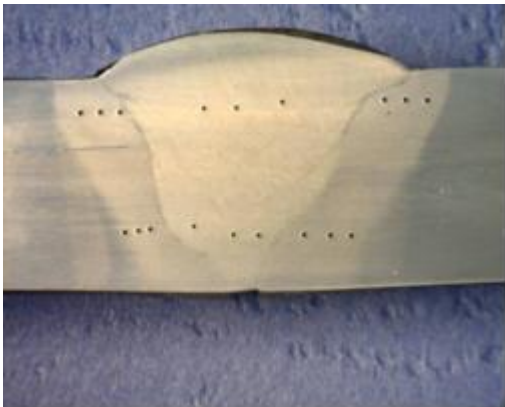
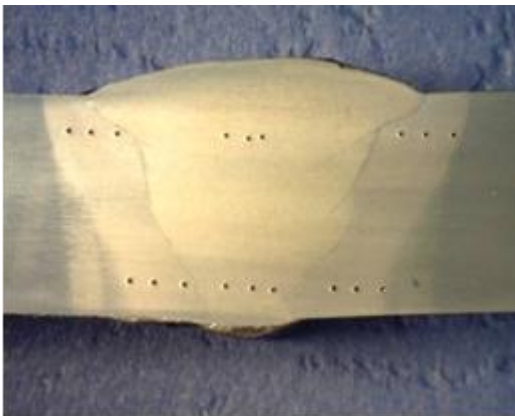



Slika 52. Mjerene geometrijske značajke makroizbruska


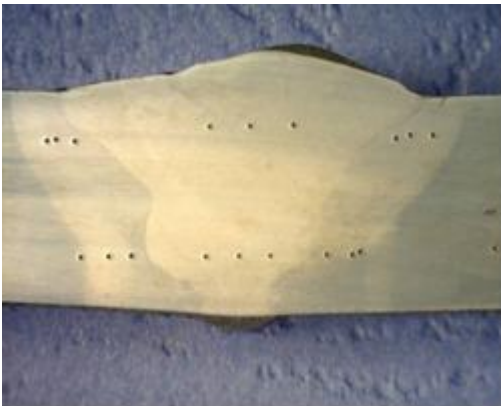
Tablica 8 Geometrijske značajke zavarenih uzoraka i makroizbrusci

Oznaka uzorka	Širina uzorka a, [mm]	Nadvišenje zavara b, [mm]	Širina ZUT-a c, [mm]	Broj prolaza	Makroizbrusak zavarenog uzorka
21	17,80	2,57	3,61	3	
13	18,84	1,95	4,28	3	
81	16,67	2,01	4,76	3	

Tablica 9 Geometrijske značajke zavarenih uzoraka i makroizbrusci (nastavak 1)

Oznaka uzorka	Širina uzorka a, [mm]	Nadvišenje zavora b, [mm]	Širina ZUT-a c, [mm]	Broj prolaza	Makroizbrusak zavarenog uzorka
33	15,53	2,05	3,98	3	
41	16,15	1,87	4,02	3	
51	17,97	2,25	4,17	3	

Tablica 10 Geometrijske značajke zavarenih uzoraka i makroizbrusci (nastavak 2)

Oznaka uzorka	Širina uzorka a, [mm]	Nadvišenje zavara b, [mm]	Širina ZUT-a c, [mm]	Broj prolaza	Makroizbrusak zavarenog uzorka
71	15,52	2,06	4,52	3	
61	17,70	2,08	4,13	3	

Na makroizbruscima se može uočiti dendritna, odnosno usmjerena struktura u području metala zavara, te smjer rasta zrna tijekom skrućivanja taline. Zrna su orijentirana okomito u odnosu na granicu područja taljenja.

7.1.1. Analiza geometrije zavarara

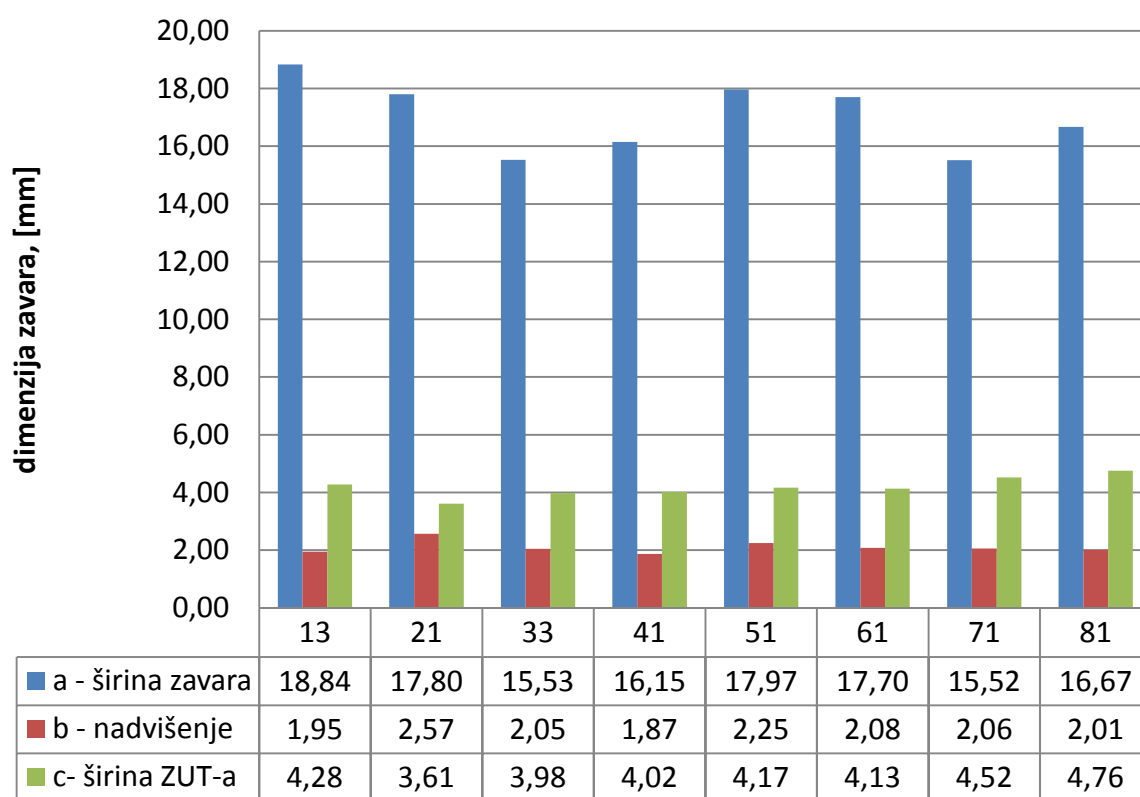
Za ovakvu vrstu prikaza uzeta su za analizu sva stanja pokusa a prikazane su izmjerene vrijednosti:

a – širina zavarara

b – nadvišenje

c – širina zone utjecaja topline

Na slici 54 su grafički prikazane geometrijske značajke zavarenih uzoraka.

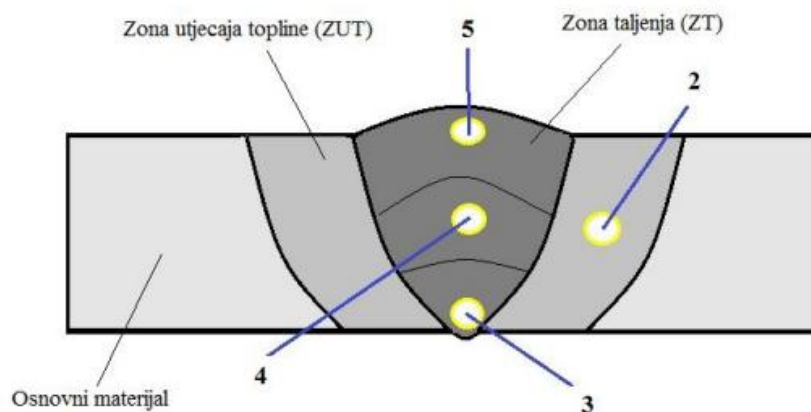


Slika 53. Geometrija zavarara prema stanju pokusa

Najveća vrijednost izmjerene širine zavarara je kod uzorka 13. Najveća širina zone utjecaja topline izmjerena je na uzorku 81. Najveće izmjerene vrijednosti širine zavarara kod uzorka 13 ne ukazuju na nikakvu anomaliju geometrije. Najmanja vrijednost širine zavarara izmjerena je kod uzorka 71, najmanja vrijednost nadvišenja zavarara izmjerena je kod uzorka 41 a najmanja širina zone utjecaja topline izmjerena je kod uzorka 21.

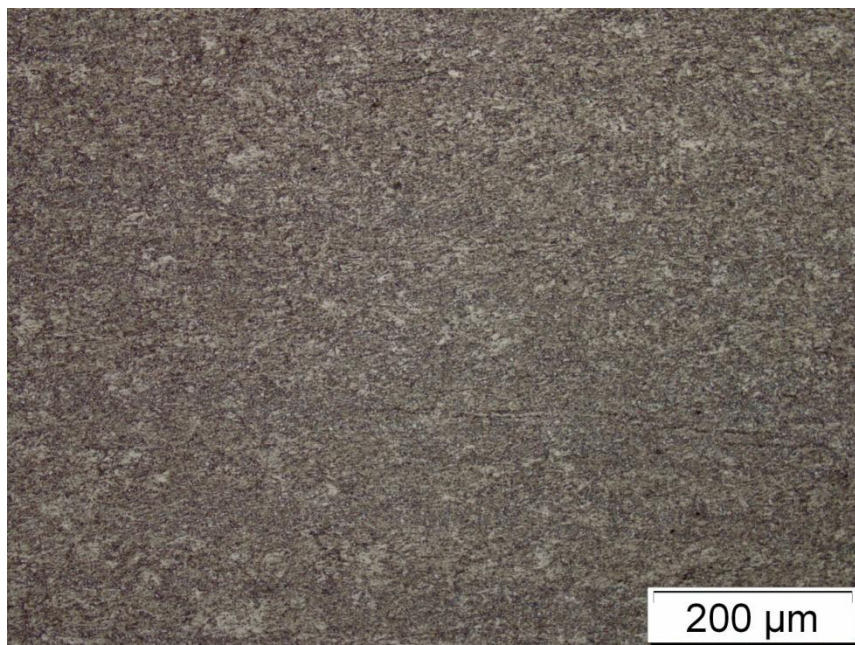
7.1.2. Analiza mikrostrukture

S obzirom da je jedan od ciljeva eksperimentalnog rada ispitivanje mikrostrukture zavarenog spoja čelika visoke čvrstoće, navodeći se po tome određeno je uzimanje uzoraka mikrostrukture iz područja zone utjecaja topline te zone taljenja, odnosno metala zavora. U metalu zavora analizirali su se uzorci mikrostrukture sa područja sredine metala zavora, područja korijena zavora, te područja nadvišenja zavora. Ovim pristupom uzimanja uzoraka mikrostrukture pokušali su se analizom uzeti u obzir mikrostrukture svih prolaza zavarivanja, dakle od korijenskog prolaza pa do završnog prolaza, uključujući i zonu utjecaja topline koja je specifična i različita od samog metala zavora. Mikrostrukturna analiza provedena je prema slici 54.



Slika 54. Snimanje uzoraka za mikroanalizu

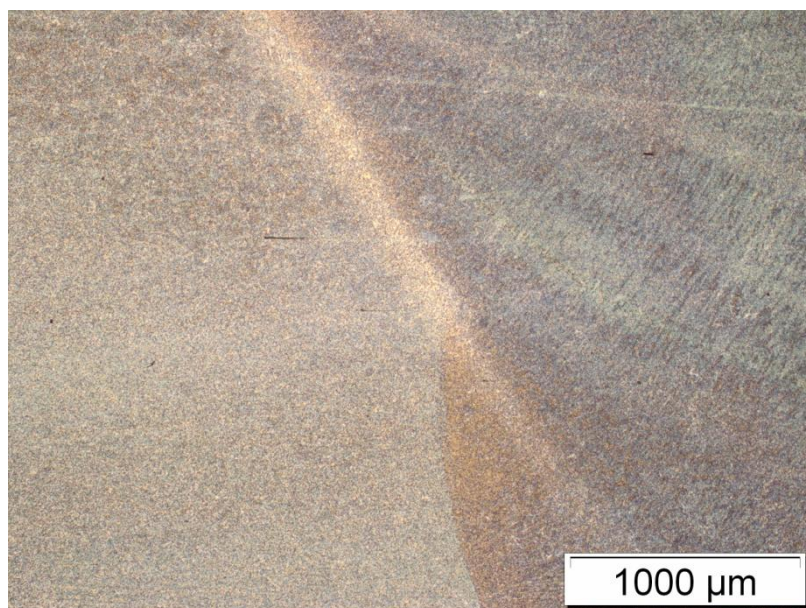
Osnovni materijal ima sitnozrnatu feritno – bainitnu mikrostrukturu, što se može vidjeti na slici 55.



Slika 55. Mikrostruktura osnovnog materijala API 5L X80 – povećanje 200x

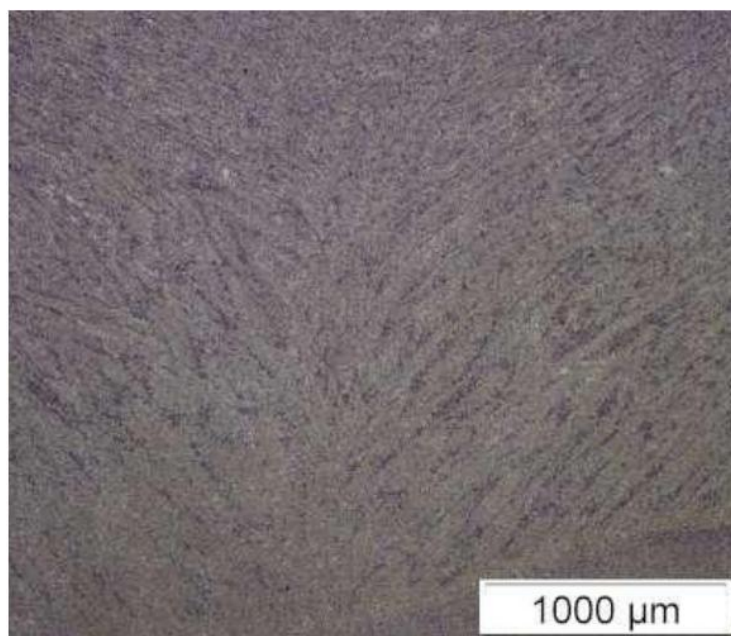
U metalu zavora pri zavarivanju dolazi do direktnog taljenja osnovnog i dodatnog materijala, dok u ZUT-u ne dolazi do taljenja, ali se opaža utjecaj povišene temperature na strukturu. Stoga se struktura ZUT-a razlikuje od strukture osnovnog materijala

Razlike pri prijelazu iz strukture ZUT-a u strukturu metala zavora vidljiva je u refleksiji svjetlosti pojedinih struktura. Struktura metala zavora na slikama 49. i 50. manje reflektira, odnosno tamnija je od strukture ZUT-a. Razlika se može ustvrditi i mjerenjem tvrdoće pojedinih dijelova zavarenog spoja. Prema izmjerenim tvrdoćama (poglavlje 6.3.) može se uočiti razlika u izmjerenim vrijednostima u metalu zavora koje su znatno veće od onih izmjerenih u ZUT-u. Postoji trend rasta tvrdoće i unutar ZUT-a (podaci izmjerenih tvrdoća se nalaze u tablici 19 poglavlje 7.2). Slika 56. prikazuje linije staljivanja i prijelaz grubozrnatog ZUT-a u strukturu metala zavora.



Slika 56. Mikrostruktura materijala kod linije staljivanja

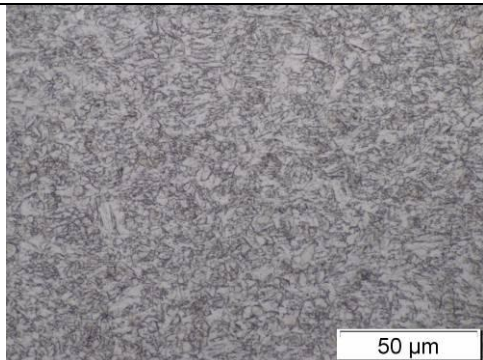

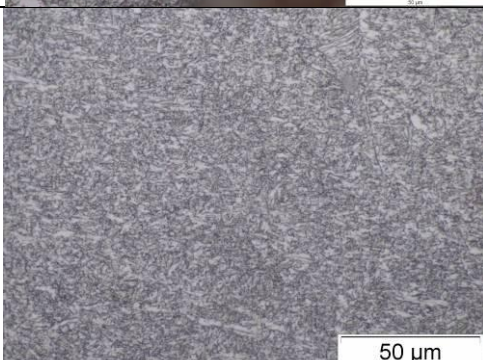

Slika 57. prikazuje strukturu metala zavara koja je nastala taljenjem, te naknadnim hlađenjem dodatnog i osnovnog materijala. Taljenjem se postiže stvaranje novih zrna, koji hlađenjem imaju tendenciju rasta u smjeru okomitom na granice metala zavara jer je to smjer maksimalnog temperaturnog gradijenta [29].



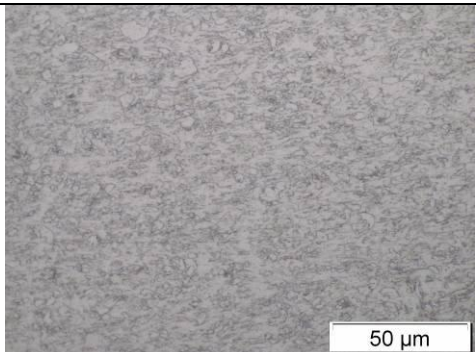

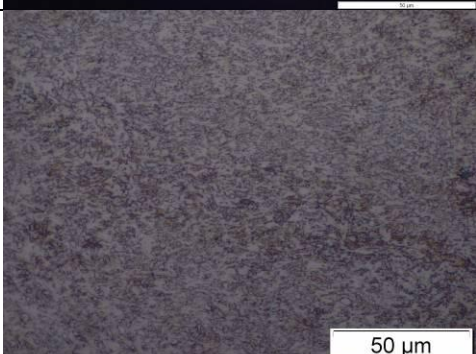

Slika 57. Mikrostruktura metala zavara

U tablicama od 11. do 19. prikazane su mikrostrukture zavara pojedinih stanja pokusa, prema rasteru sa slika 54.

Tablica 11. Prikaz mikrostrukture u uzorku 13

Pozicija(13)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosrukture
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubozrnata feritno - perlitna	

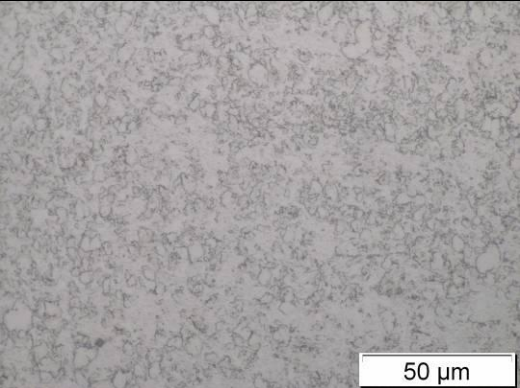
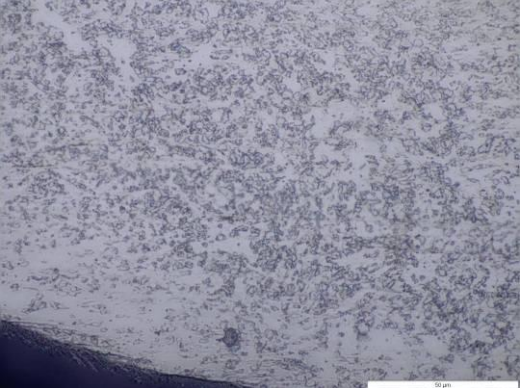
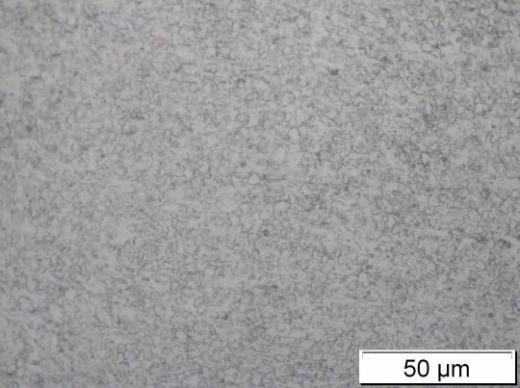
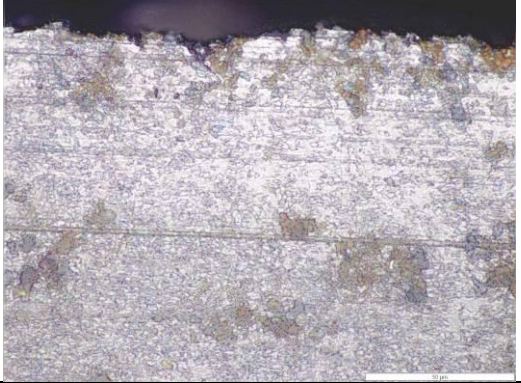
Tablica 12. Prikaz mikrostrukture u uzorku 21

Pozicija(21)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrostrukture
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavarava	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavarava	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavarava	Grubožrnata feritno - perlitna	

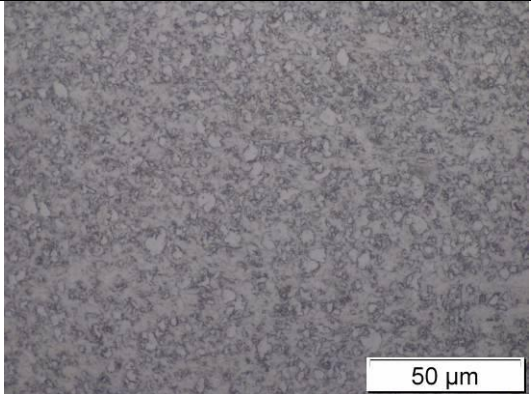
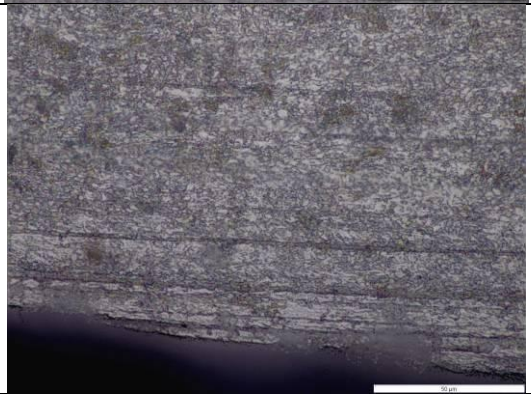
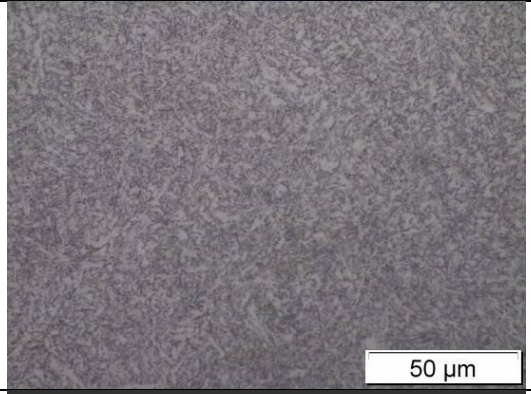
Tablica 13. Prikaz mikrostrukture u uzorku 33

Pozicija(33)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosrukture
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubozrnata feritno - perlitna	

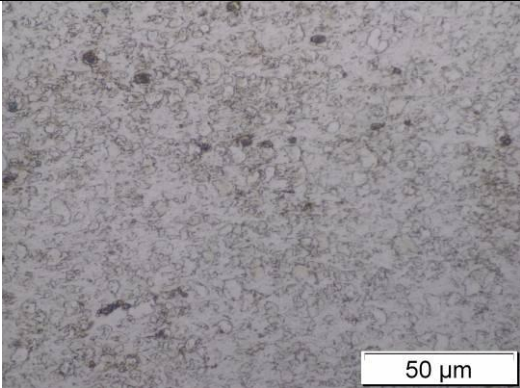
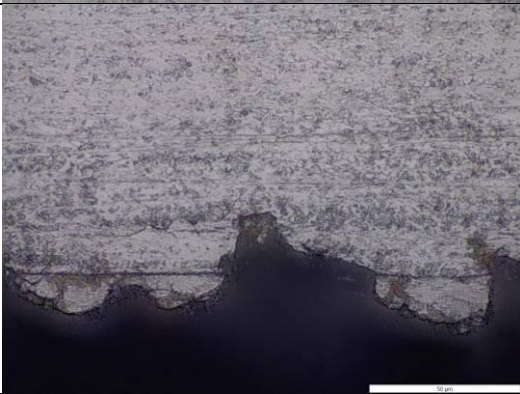
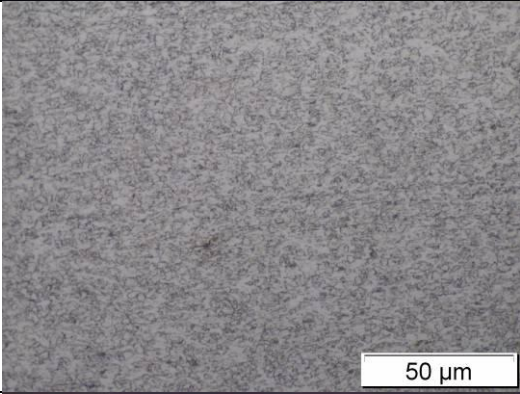

Tablica 14. Prikaz mikrostrukture u uzorku 41

Pozicija(41)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosrukture
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubožrnata feritno - perlitna	

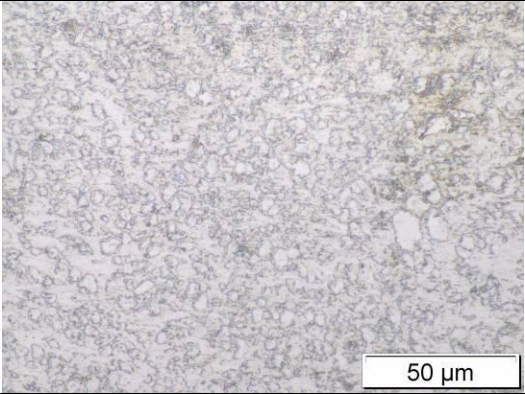
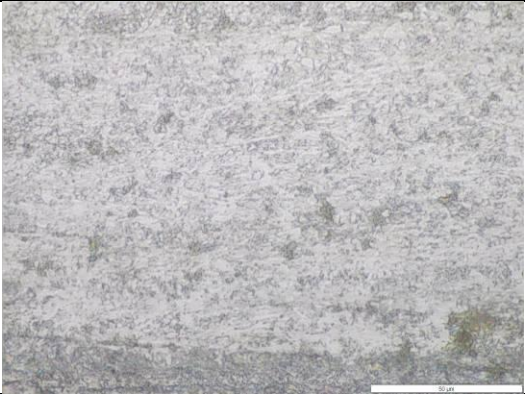
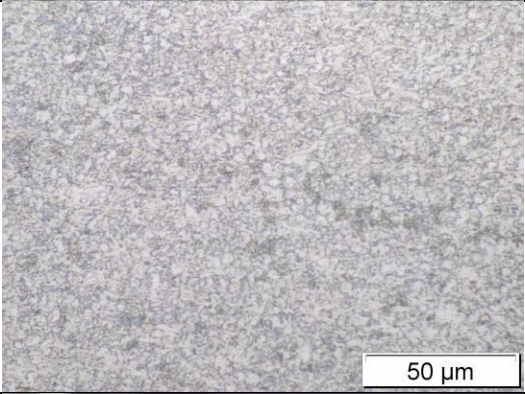
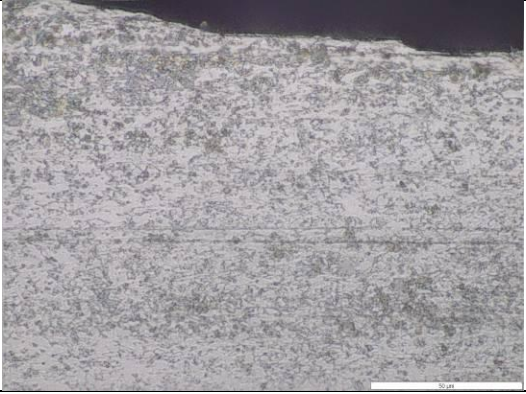
Tablica 15. Prikaz mikrostrukture u uzorku 51

Pozicija(51)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosructure
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubozrnata feritno - perlitna	

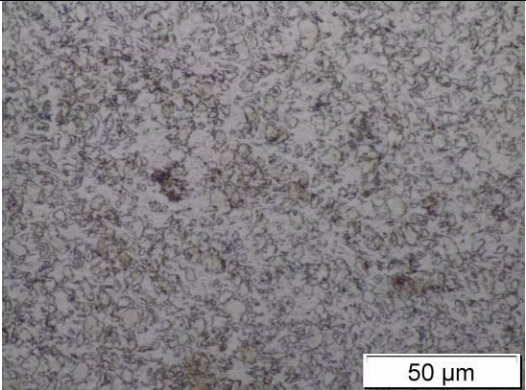
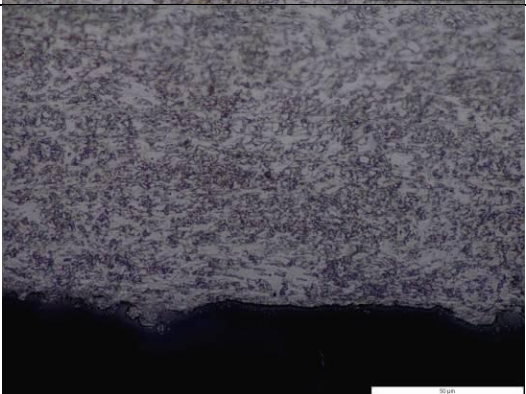
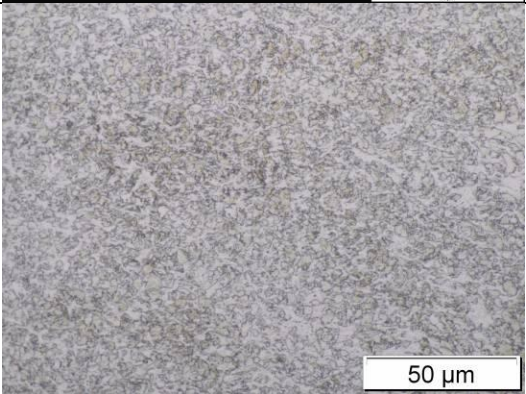
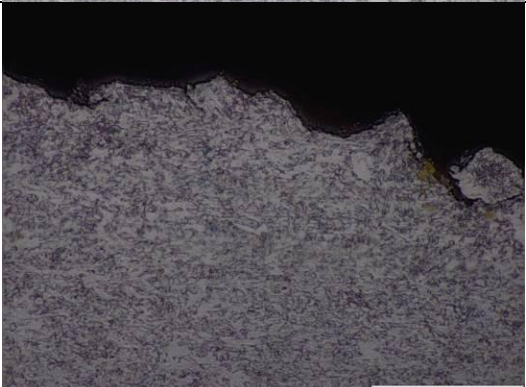
Tablica 16. Prikaz mikrostrukture u uzorku 61

Pozicija(61)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosructure
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubozrnata feritno - perlitna	

Tablica 17. Prikaz mikrostrukture u uzorku 71

Pozicija(71)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosrukture
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubožrnata feritno - perlitna	

Tablica 18. Prikaz mikrostrukture u uzorku 81

Pozicija(81)	Specifična mikrostruktura	Prikaz mikrosructure
ZUT	Feritno - bainitna	
Korijen zavora	Normalizirana feritno - perlitna	
Sredina metala zavora	Usmjereno feritno - perlitna	
Vrh zavora	Grubožrnata feritno - perlitna	

Pregledom slika mikrostruktura prikazanih u tablicama mogu se primijetiti specifične mikrostrukture pojedinih dijelova zavarenog spoja. U ZUT-u se pojavljuje feritno - bainitna struktura koja je sitnija, odnosno finija u odnosu na strukturu osnovnog materijala. U sredini metala zavora zapaža se grubozrnata usmjerena feritno-perlitna struktura. Uslijed više prolaznog zavarivanja za očekivati je bilo da će struktura korijena, uslijed utjecaja unosa topline prilikom zavarivanja popune, biti normalizirana i u odnosu na završni prolaz sitnozrnata. U skladu s tim završni prolaz, odnosno lice zavora ima najgrublju feritno -perlitnu strukturu. Bitne razlike u veličini zrna, kako je već napomenuto, dokazuju i vrijednosti izmjerenih tvrdoća. U metalu zavora, gdje je struktura i najgrublja, odnosno zrno najveće izmjerene su i najveće vrijednosti tvrdoće.

Dobivene mikrostrukture očekivane su s obzirom na primijenjene parametre pokusa te su skladne sa ostalim rezultatima mjerenja.

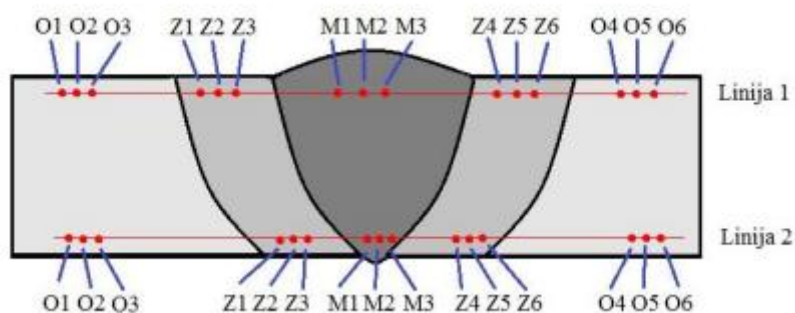
Prema [21], od svih mikrostrukturnih konstituenata ferit ima najmanju tvrdoću i čvrstoću te najveću plastičnost, dok je mikrotvrdoća bainita manja od one perlita, što se može objasniti na način da perlit nastaje iz obogaćenog austenita zbog čega u strukturi sadrži puno veći udio cementita nego bainit. Cementit ima najznačajniji utjecaj na mehanička svojstva bainita čiji se oblik, dimenzije te dispergiranost u feritnoj fazi mijenjaju s temperaturom pretvorbe tj. sa unosom topline. Na temelju toga lako je uočiti povezanost između povišene tvrdoće metala zavora koji ima feritno -perlitnu strukturu, sa smanjenjem tvrdoće u području ZUT-a koji ima manju tvrdoću s obzirom na metal zavora.

Ispitivanja mikrostrukture definirane ovim eksperimentom ne uključuju detaljniju analizu uključaka, njihova svojstva niti njihov kemijski sastav.

7.2. Rezultati mjerenja tvrdoće HV10

Tvrdoća HV10 često se uzima kao kontrolni faktor kada se govori o procjeni zavarljivosti materijala [3].

Na svakom uzorku načinjeno je 30 mjerenja, u dvije linije po 15 mjerenja. Udaljenost između mjernih točaka je približno 0,5 mm. Normom HRN EN ISO 15614-1 utvrđeno je kako maksimalna vrijednost tvrdoće zavarenog spoja za čelik ne bi smjela iznositi više od 380 HV10. Prema podacima iz tablice može se ustvrditi kako niti jedna od izmjerenih vrijednosti ne prelazi vrijednost tvrdoće propisanu normom. Tvrdoća HV10 mjerena je na makroizbruscima prema rasteru prikazanom na slici 49.



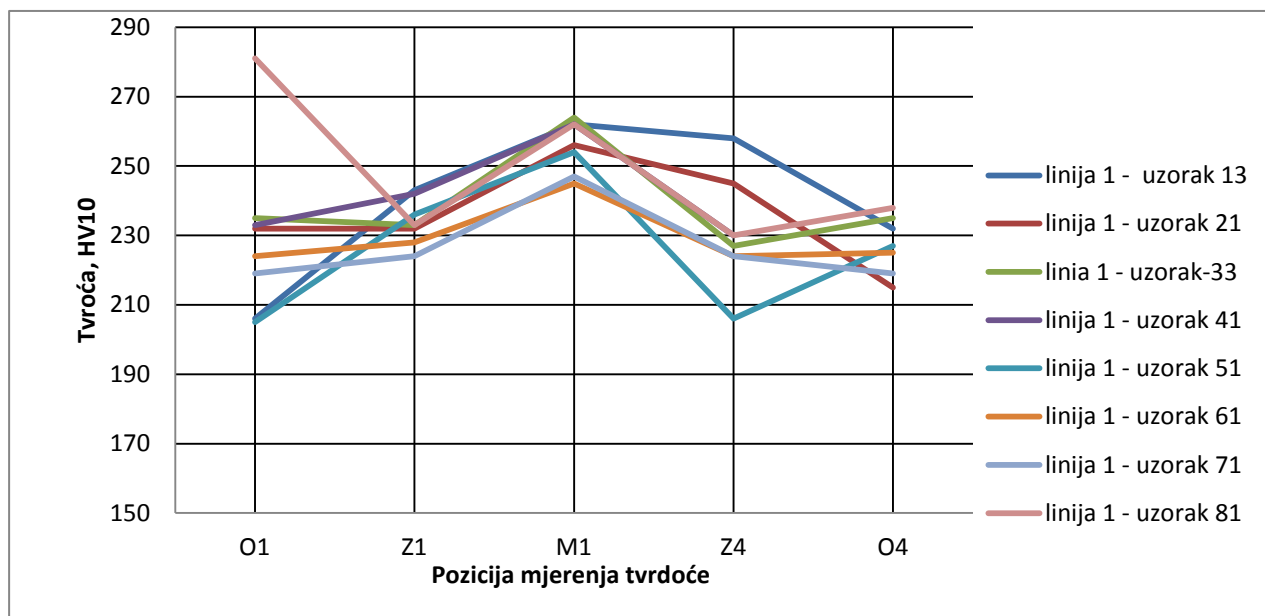
Slika 58. Raspored mjernih mjesta za mjerenje tvrdoće HV10

U tablici 19 prikazani su svi podaci izmjerenih tvrdoća.

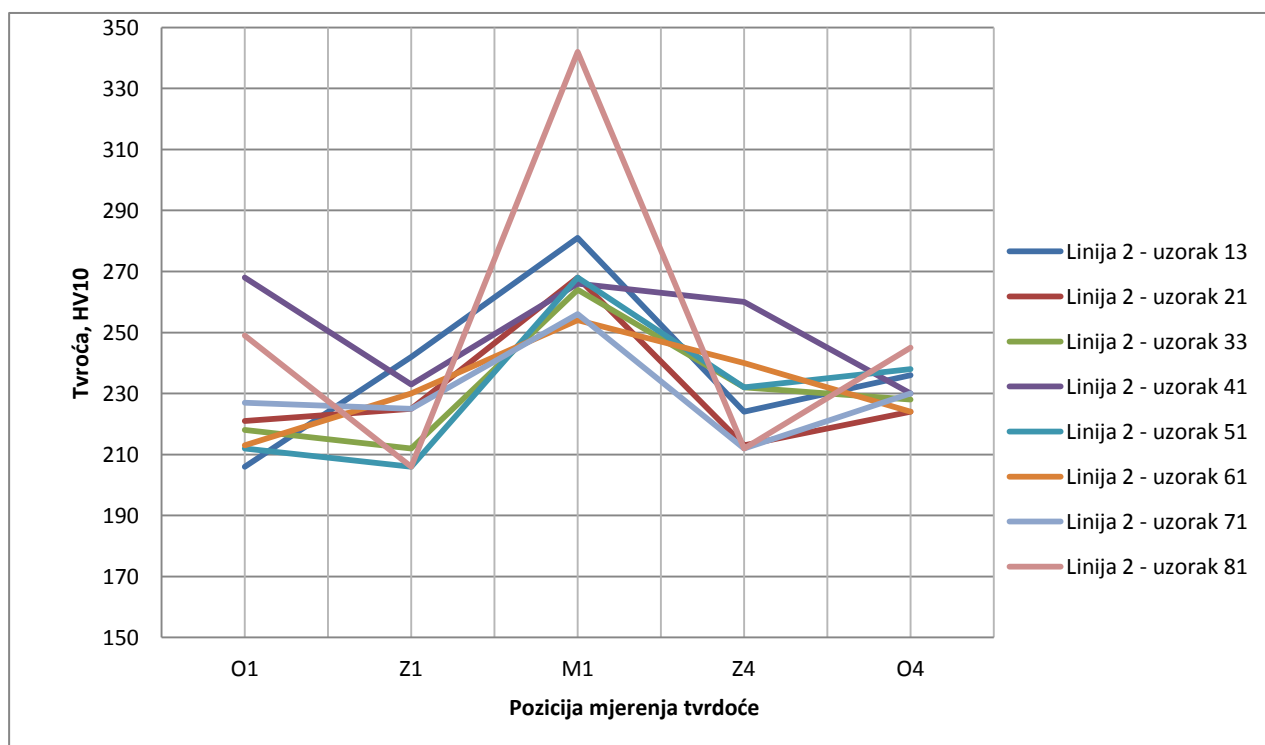
Tablica 19. Vrijednosti izmjerene tvrdoće HV10

BROJ UZORKA	13	21	33	41	51	63	73	83
POZICIJA - BROJ LINIJE								
O1-1	206	225	225	232	199	221	212	281
O2-1	206	227	235	227	205	221	218	254
O3-1	206	232	232	233	196	224	219	245
Z1-1	238	221	206	206	213	221	197	202
Z2-1	243	232	222	218	221	206	210	212
Z3-1	232	228	233	242	236	228	224	233
M1-1	262	256	258	258	253	242	243	253
M2-1	253	254	256	262	254	245	245	262
M3-1	258	251	264	254	212	242	247	302
Z4-1	228	245	227	230	206	219	193	228
Z5-1	224	230	212	222	206	203	201	230
Z6-1	232	228	222	206	206	224	224	230
O4-1	232	206	233	228	213	225	219	227
O5-1	225	213	227	225	227	227	219	233
O6-1	230	215	235	228	225	225	218	238
O1-2	206	216	213	268	202	212	227	249
O2-2	206	221	215	232	212	213	225	232
O3-2	206	218	218	232	206	212	224	232
Z1-2	203	212	199	203	189	196	206	206
Z2-2	242	206	206	227	197	230	212	205
Z3-2	203	225	212	233	206	194	225	206
M1-2	281	254	264	245	256	254	254	281
M2-2	262	268	249	262	249	235	256	342
M3-2	276	268	254	266	268	240	224	264
Z4-2	206	212	206	232	212	198	198	206
Z5-2	206	192	221	260	206	213	203	198
Z6-2	224	213	232	240	232	240	212	212
O4-2	236	221	227	228	227	224	230	224
O5-2	236	221	225	230	225	219	227	236
O6-2	230	224	228	230	238	218	221	245

Od svakog od tri mjerenja po poziciji uzeta je najveća vrijednost izmjerene tvrdoće te su na slici 59 prikazani profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća po liniji 1, a na slici 60 dani su profili izmjerenih vrijednosti tvrdoća po liniji 2



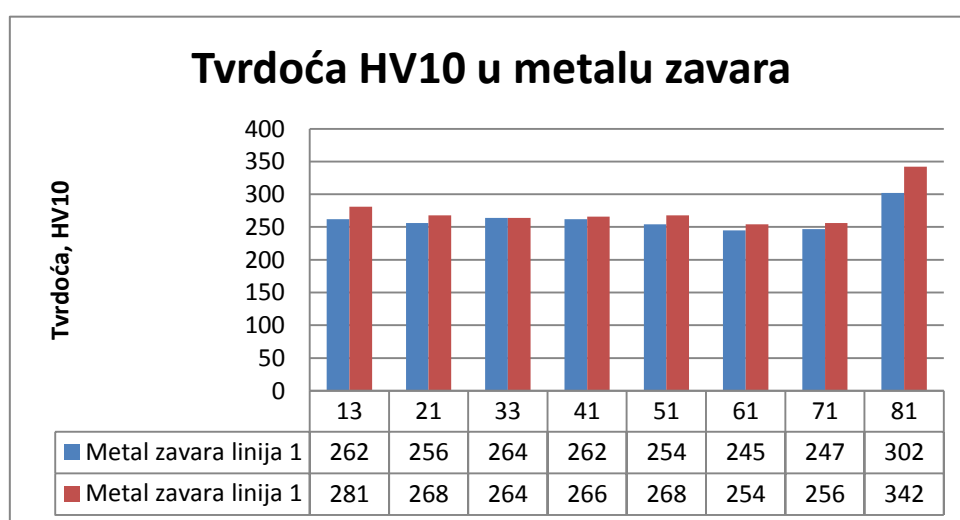
Slika 59. Raspored vrijednosti tvrdoća linija 1



Slika 60. Raspored vrijednosti tvrdoća linija 2

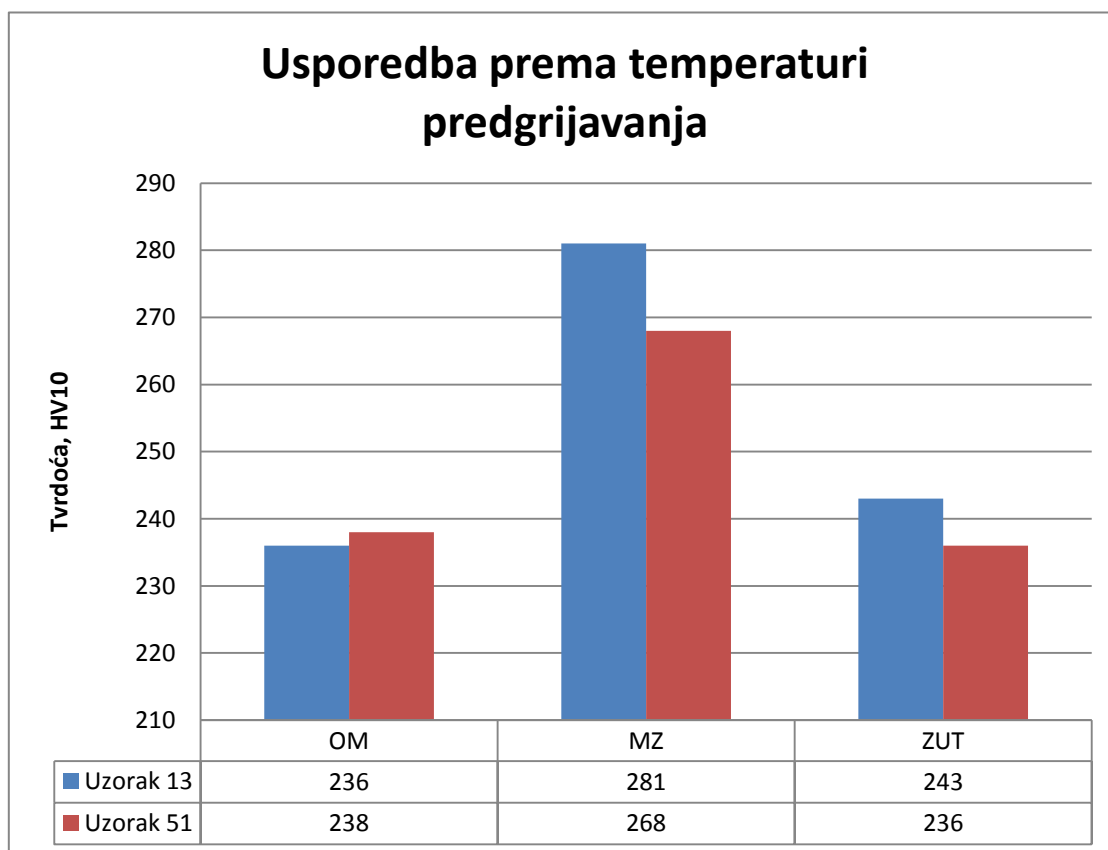
Prema slikama 59 i 60 primjećuje se trend pada tvrdoće u ZUT-u, te dostizanje maksimalne tvrdoće u metalu zavara. Najveća izmjerena tvrdoća je u metalu zavara na uzorku 81 u liniji 2 mjerenja. Slijedeća najveća vrijednost izmjerene tvrdoće je vrijednost izmjerena na liniji 1 mjerenja na uzorku 81 na poziciji osnovnog materijala. Uzorak 81 ima najveću temperaturu predgrijavanja no korelacija između izmjerene tvrdoće i visine temperature predgrijavanja se ne može ustvrditi jer je uzorak 81 (kod kojeg je izmjerena najveća tvrdoća) predgrijavan sa temperaturom od 115 °C isto kao i uzorci osim 51, 61, 71 kod kojih nismo zabilježili povećane tvrdoće.

Raspored izmjerenih tvrdoća u metalu zavara prikazan je dijagramom na slici 61.



Slika 61. Dijagram izmjerenih tvrdoća u metalu zavara

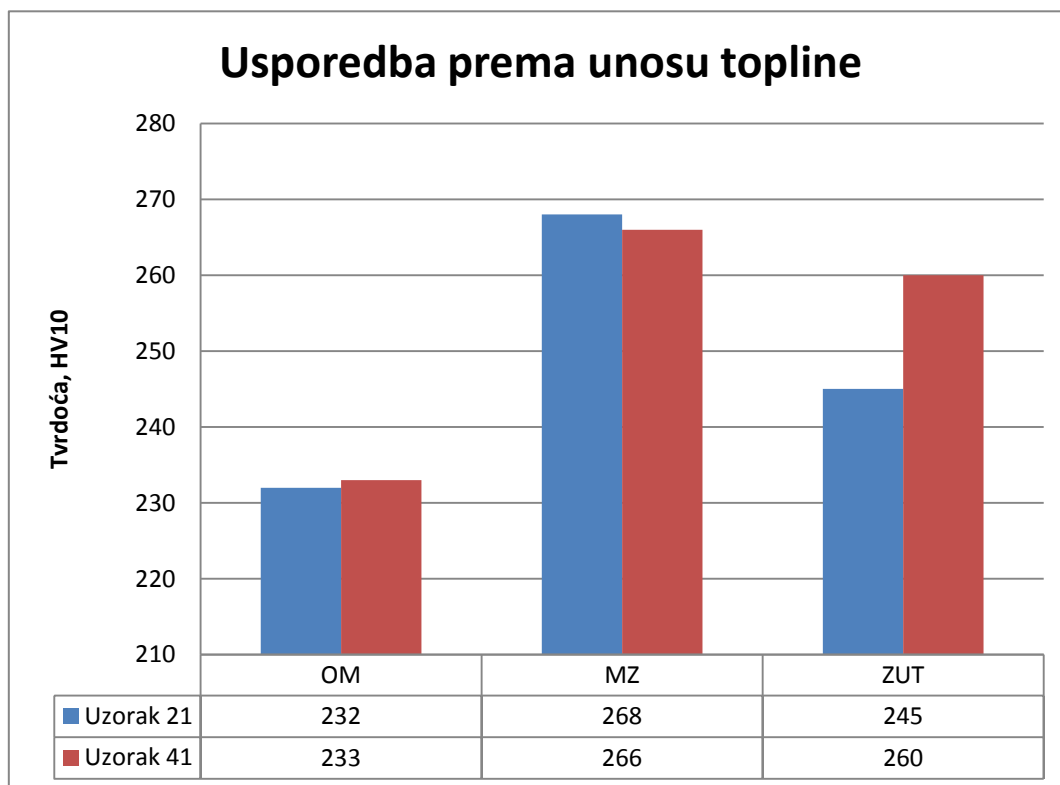
Radi što preciznije analize izmjerenih vrijednosti tvrdoće, analizirati će se uzorci na način da ćemo usporediti dva uzorka koja će od tri moguća parametra imati dva ista a razlikovati će se u trećem. Cilj analize je uočiti razliku ili pak neku povezanost izmjerenih vrijednosti i parametra koji smo mijenjali. Vrijednosti na narednim dijagramima su najveće vrijednosti izmjerene u pojedinim područjima mjerenja na liniji 1 i 2. Na slici 62 prikazan je dijagram vrijednosti tvrdoće za uzorke 13 i 51, kod kojih je planom pokusa određena najveća i najmanja temperatura predgrijavanja. Uzorak 13 ima najnižu temperaturu predgrijavanja u iznosu od 45 °C, dok uzorak 51 ima najveću temperaturu predgrijavanja u iznosu od 115 °C. Ostala dva parametra, unos topline i postotak argona u ugljičnom dioksidu, kod ova dva uzorka su isti. Usporedba uzoraka 13 i 51 prema temperaturi predgrijavanja nalazi se na slici 62.



Slika 62. Usporedba tvrdoće kod uzoraka 13 i 51

Na temelju dijagrama prikazanog na slici 62 može se zaključiti da uzorak 13 pokazuje veću tvrdoću u metalu zavara u usporedbi s uzorkom 51, dok uzorak 13 ima nešto veću tvrdoću u ZUT-u uzorak 51 ima neznatno veću tvrdoću u osnovnom materijalu.

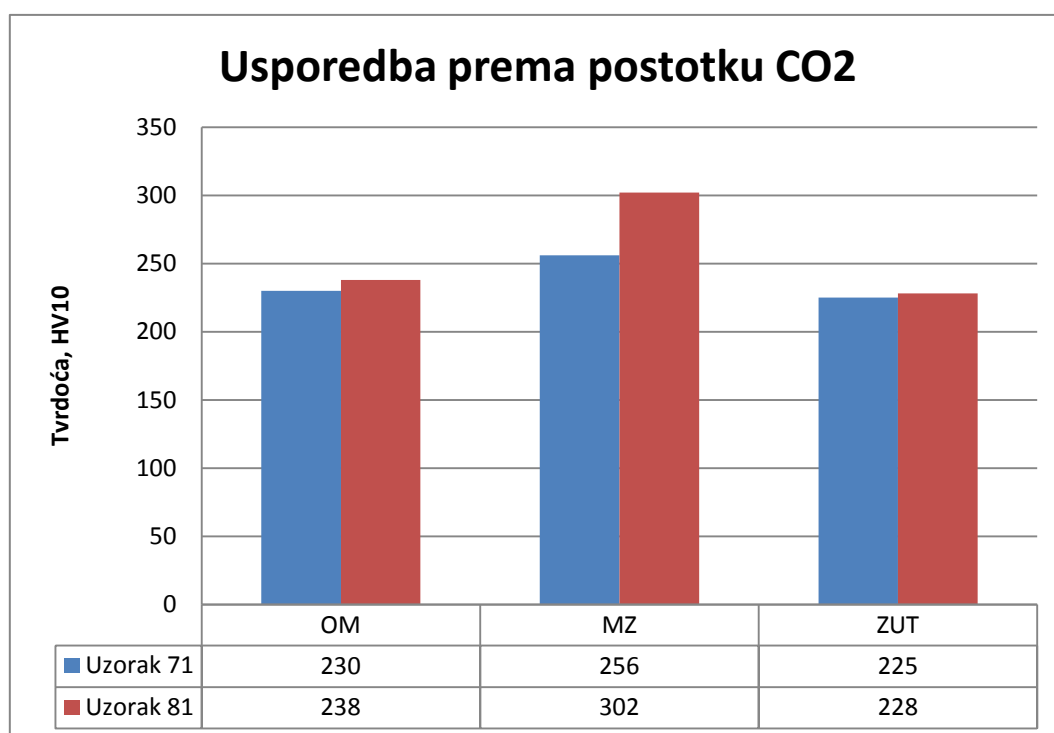
Na slici 63 prikazan je dijagram vrijednosti tvrdoće za uzorke 21 i 41, kod kojih je planom pokusa određena najmanji i najveći unos topline. Uzorak 21 ima najmanji unos topline u iznosu od 10 kJ/cm, dok uzorak 41 ima veći unos topline u iznosu od 14 kJ/cm. Ostala dva parametra, temperatura predgrijavanja i postotak argona u ugljičnom dioksidu, kod ova dva uzorka su isti. Usporedba uzoraka 21 i 41 prema unosu topline nalazi se na slici 63.



Slika 63. Usporedba tvrdoće kod uzoraka 21 i 41

Na temelju dijagrama prikazanog na slici 63 može se ustvrditi kako je niži unos topline tijekom zavarivanja kod uzorka 21 rezultirao približno istom tvrdoćom u području osnovnog materijala i metala zavora, dok su vrijednosti izmjenjenih veličina u zoni utjecaja topline veće za uzorak 41 kod kojeg je bio veći unos topline.

Na slici 64 prikazan je dijagram vrijednosti tvrdoće za uzorke 71 i 81, kod kojih je planom pokusa određen najveći i najmanji udio ugljičnog dioksida u argonu u zaštitnom plinu. Uzorak 71 ima manji postotak CO₂ u iznosu od 12%, dok uzorak 81 ima veći udio CO₂ u iznosu od 24%. Ostala dva parametra, temperatura predgrijavanja i unos topline tijekom zavarivanja, kod ova dva uzorka su isti.



Slika 64. Usporedba tvrdoća kod uzorka 71 i 81

Sve izmjerene tvrdoće su kod uzorka 81 veće od uzorka 71. Tvrdoće su veće u osnovnom materijalu u materijalu zavara i u zoni utjecaja topline. Razlike u tvrdoći su minimalne osim u metalu zavara gdje uzorak 81 pokazuje nešto veće vrijednosti u odnosu na uzorak 71.

Niske vrijednosti izmjerene tvrdoće u područjima ZUT-a kod svih stanja pokusa dokazuju sitnozrnatost strukture u tom području zavarenog spoja. Najveće izmjerene tvrdoće u područjima metala zavara dokazuju njegovu grubozrnatost.

8. ZAKLJUČAK

Tekst zaključka

U eksperimentalnom dijelu rada provedena su ispitivanja geometrije zavora, mikrostrukture te mjerenje tvrdoće. Analize su provedene u odnosu na tri ključna parametra zavarivanja: postotak CO₂ u Ar, unos topline i temperatura predgrijavanja.

Temeljem provedenih ispitivanja i analize na uzorcima moguće je donijeti zaključke kako slijedi:

- Na temelju analize geometrije zavora u odnosu na parametre može se zaključiti kako na širinu i nadvišenje zavora najveći utjecaj ima broj prolaza prilikom zavarivanja. Najveća širina ZUT-a pojavljuje se kod uzorka 81 i posljedica je parametara zavarivanja.
- Analizom tvrdoće utvrđeno je kako je pri većoj temperaturi predgrijavanja došlo do smanjenja tvrdoće kod uzorka 51 u području zone utjecaja topline i metala zavora, dok su u osnovnom materijalu tvrdoće približno iste.
- Na temelju daljnje analize tvrdoće može se ustvrditi kako je niži iznos unešene topline tijekom zavarivanja kod uzorka 21 rezultirao nižom tvrdoćom u zoni utjecaja topline, dok su vrijednosti izmjerenih veličina u osnovnom materijalu i materijalu zavora približno iste.
- Analiza utjecaja sastava zaštitnog plina, postotak CO₂ u Ar, rezultirala je povišenom tvrdoćom kod uzorka koji je imao veći postotak CO₂ u argonu.

- Analizom mikrostrukture ustanovljeno je kako se redom kod svih stanja pokusa pojavljuje nešto mekša feritno-bainitna struktura u ZUT-u koja u smjeru prema metalu zavara prelazi u grubozrnatu strukturu. To za posljedicu ima povišenje tvrdoće u zoni taljenja. Metal zavara ima tvrdu feritno - perlitnu strukturu, a veličina zrna mijenja se od sitnije normalizirane strukture korijena zavara do grube strukture završnog prolaza. Struktura međuprolaza je usmjerena, dendritna struktura. Sve utvrđene mikrostrukture u korelaciji su sa izmjerenim tvrdoćama.

-

Za detaljniju analizu mikrostrukture i njezinih svojstava kao i konstituenata i faza, preporučuju se dodatna ispitivanja kemijskog sastava i izračuna udjela pojedinih mikrostrukturnih faza u određenim dijelovima zavarenog spoja.

LITERATURA

- [1] M. Novosel, D. Krumes; Željezni materijali II. dio: Konstrukcijski čelici; Slavonski Brod; 1995
- [2] Vesna Kuzman; Diplomski rad; Zagreb; 2012
- [3] Garašić I.; Osjetljivost čelika X70 na hladne pukotine pri mokrom podvodnom zavarivanju; Doktorski rad, Zagreb, 2008.
- [4] Ivušić, V., Franz, M., Španiček, Đ., Ćurković, L.; Materijali 1; FSB, Zagreb, 2011.
- [5] Filetin, T., Kovačiček, F., Indof, J.; Svojstva i primjena materijala; FSB, Zagreb, 2002.
- [6] Falber, S.; Pipeline engineering; ISBN 978-3-9501528-2-1, Austrija, 2009.
- [7] M. Novosel, D. Krumes; Posebni čelici; Slavonski Brod, 1998.
- [8] Iljkić, D.; Prilog razvoju procjene mehaničkih svojstava poboljšanog čelika i čeličnog lijeva; Doktorski rad; Tehnički fakultet u Rijeci, 2010.
- [9] Trpimir Barun; Diplomski rad; Zagreb; 2009
- [10] J. Malcolm Gray, F. Siciliano; High Strength Microalloyed Linepipe: Half a Century of Evolution; Microalloyed Steel Institute; Houston TX, 2009
- [11] Darko Landek; Materijali i proizvodni postupci; Fakultet strojarstva i brodogradnje u Zagrebu, 2012
- [12] Kudumović, Dž.; Zavarivanje i termička obrada; 1997
- [13] Krumes D.; Toplinska obrada; Strojarski fakultet u Slavonskom Brodu, 2000.
- [14] Barun, T.; Diplomski rad; <http://www.fsb.unizg.hr/library/fileopen.php?id=458> dostupno 02.06.2012.
- [15] S. Kralj, I. Samardžić; Pregled metoda ispitivanja sklonosti prema nastanku hladnih pukotina; Časopis Zavarivanje 35 (1992), 5-6
- [16] S. Kralj, Š. Andrić; Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka; FSB Zagreb, 1992.
- [17] Laboratorij za zavarivanje
- [18] Laboratorij za metalografiju
- [19] Runjić – Sokele, M.; Utjecaj parametara razvlačnog puhanja na svojstva PET boca; FSB 2008.

[20] Jankovich, D.; Ispitivanje komora za termičku obradu polutrajnih mesnih proizvoda; Magistarski rad; FSB, 2011.

[21] Smokvina Hanza, S.; Matematičko modeliranje i računalna simulacija mikrostrukturnih pretvorbi i mehaničkih svojstava pri gašenju čelika; Tehnički fakultet u Rijeci, 2011.